

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Ante Komljenović

Zagreb, 2013. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Danijel Pavković, dipl. ing.

Student:

Ante Komljenović

Zagreb, 2013. godina.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se prije svega, mentoru doc. dr. sc. Danijelu Pavkoviću i asistentu Mariju Hrgetiću, dipl. ing. koji su mi svojim znanjem i savjetima potpomogli u realiziranju ovoga rada. Također, zahvaljujem se svojim roditeljima i prijateljima koji su mi omogućili da svoje studiranje uspješno privedem kraju.

Ante Komljenović



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Ante Komljenović** Mat. br.: 0035165181

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Modeliranje i regulacija baterijskih i ultrakondenzatorskih sustava za pohranu električne energije**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Modeling and Control of Battery and Ultracapacitor-Based Energy Storage Systems**

Opis zadatka:

Sustavi za pohranu električne energije, kao što su baterije i ultrakondenzatori imaju široko područje primjena koje uključuje besprekidne i pričuvene izvore napajanja, te sustave za regulaciju napona i frekvencije u izoliranim elektroenergetskim sustavima s visokim udjelom obnovljivih izvora energije. Za kvalitetnu integraciju sustava za pohranu energije potrebno je dobro poznavati njihove ključne parametre kao što su kapacitet skladištenja i unutarnji otpor, te je potrebno regulirati njihovu struju i napon tijekom procesa punjenja i pražnjenja. U radu je potrebno napraviti sljedeće:

1. Dati kratki pregled tehnologija elektrokemijskih baterija i ultrakondenzatora, te ih usporediti prema temeljnim karakteristikama kao što su gustoća energije, gustoća snage, cijena, pouzdanost, izdržljivost, te dobavljalivost.
2. Opisati standardne modele nadomjesnih električnih krugova za elektrokemijske baterije, a koji uključuju nabojni kapacitet, napon otvorenog kruga i elektromotornu silu pod opterećenjem, te unutarnji otpor. Također treba opisati osnovni model ultrakondenzatora temeljen na nadomjesnom otporničko-kapacitivnom (RC) strujnom krugu koji uključuje i efekte samopražnjenja.
3. Eksperimentalno odrediti ključne parametre nadomjesnih modela olovne baterije i ultrakondenzatora, a koji će poslužiti za izradu pripadajućih simulacijskih modela.
4. Predložiti i razviti koncept regulacije struje punjenja i pražnjenja baterija i ultrakondenzatora i provjeriti njihovu funkcionalnost simulacijama na računalu i eksperimentalno na laboratorijskom postavu.

Zadatak zadan:

6. prosinca 2012.

Rok predaje rada:

7. veljače 2013.

Predviđeni datum obrane:

13. - 15. veljače 2013.

Zadatak zadao:

Danijel Pavković

Doc. dr. sc. Danijel Pavković

Predsjednik Povjerenstva:

Franjo
Prof. dr. sc. Franjo Cajner

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK	X
1. UVOD	1
2. BATERIJSKI I ULTRAKONDENZATORSKI SUSTAVI ZA SKLADIŠTENJE ELEKTRIČNE ENERGIJE	3
2.1. Pregled tehnologija elektrokemijskih baterija	3
2.2. Opće karakteristike ultrakondenzatora	7
2.3. Usporedba prema temeljnim karakteristikama	9
3. STANDARDNI MODELI ELEKTROKEMIJSKIH BATERIJA I ULTRAKONDENZATORA	11
3.1. Standardni modeli nadomjesnih strujnih krugova za elektrokemijske baterije	11
3.2. Matematički modeli elektrokemijskih baterija	13
3.3. Standardni modeli nadomjesnih strujnih krugova za ultrakondenzatore i pripadajući matematički modeli	15
4. EKSPERIMENTALNI POSTAV ZA ISPITIVANJE BATERIJA I ULTRAKONDENZATORA	18
4.1. DC/DC pretvarači	20
4.1.1. Jedno-kvadratni DC/DC pretvarači	20
4.1.2. Dvo-kvadratni silazno-uzlazni DC/DC pretvarač	22
5. PROJEKTIRANJE REGULACIJSKOG SUSTAVA TESTNOG POSTAVA	25
5.1. Projektiranje regulatora struje i regulatora napona DC međukruga	25
5.2. Analiza robusnosti regulacijskog kruga struje	28
5.3. Eksperimentalna provjera regulacijskih sustava	30
6. EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE PARAMETARA NADOMJESNIH MODELA OLOVNE BATERIJE I ULTRAKONDENZATORA	35
6.1. Identifikacija matematičkog modela olovne baterije	35
6.1.1. Nadomjesni strujni krug olovne baterije	35
6.1.2. Određivanje napona otvorenog kruga i estimacija kapaciteta pražnjenja	38
6.1.3. Određivanje elektromotorne sile i statičkih krivulja unutarnjeg otpora	41
6.1.4. Karakterizacija dinamike napona na stezaljkama baterije	48
6.1.5. Validacija simulacije kvazi-stacionarnog modela baterije	50
6.2. Identifikacija matematičkog modela ultrakondenzatora	52
6.2.1. Nadomjesni strujni krug ultrakondenzatora	52
6.2.2. Eksperimenti punjenja/pražnjenja konstantnom strujom i samopražnjenja	53
6.2.3. Identifikacija ARX modela ultrakondenzatora	56
6.2.4. Validacija simulacijskog modela ultrakondenzatora	60
7. ZAKLJUČAK	62

LITERATURA.....	64
DODATCI.....	66

POPIS SLIKA

Slika 1.	Shematski prikaz elektrokemijske ćelije i događanja u njoj za vrijeme: a) pražnjenja i b) punjenja, [2]	3
Slika 2.	Shematski prikazi koncepata nekih baterijskih tehnologija: lijevo je visokotemperaturna baterija (NaS), [3], a desno protočna baterija, [4]	6
Slika 3.	Shematski prikaz razlike u strukturi između klasičnog kondenzatora i superkondenzatora, [4]	7
Slika 4.	Nadomjesni strujni krugovi elektrokemijskih baterija: a) „Jednostavni model baterije“, b) „Theveninov model baterije“	11
Slika 5.	Nadomjesni strujni krugovi elektrokemijskih baterija: a) „Otpornički Theveninov model baterije“, b) kvazi-statički model baterije preporučen u literaturi [6] i [8].	12
Slika 6.	Blokovski dijagrami baterija: a) sa strujom baterije na ulazu modela, b) sa naponom baterije na ulazu modela, c) model baziran na protoku snaga	15
Slika 7.	Ekvivalentni strujni krug ćelije ultrakondenzatora, [6]	16
Slika 8.	Modeli ultrakondenzatora prema shemi nadomjesnog strujnog kruga sa naponskim ulazom (a) i strujnim ulazom (b)	16
Slika 9.	Blokovski dijagram dinamičkog modela ultrakondenzatora baziran na protoku snage	17
Slika 10.	Principna shema laboratorijskog postava za ispitivanje baterija i ultrakondenzatora	18
Slika 11.	Fotografija unutrašnjosti razvodnog ormara pretvarača snage sa pridruženim upravljačkim hardverom	19
Slika 12.	Osnovne konfiguracije jedno-kvadratnih DC/DC pretvarača, [9]	21
Slika 13.	Shema silazno-uzlaznog pretvarača s istovremenim upravljanjem obima tranzistorima, [9]	22
Slika 14.	Valni oblici napona i izlazne struje te stanja vođenja komponenata dvo-kvadrantnog pretvarača sa Slike 12., [9]	24
Slika 15.	Blokovski dijagrami regulacijskog kruga struje baterije (a) i ultrakondenzatora (b)	26
Slika 16.	Blokovski dijagram regulacijskog kruga napona DC međukruga	26
Slika 17.	Grafovi lokusa korijena regulacijskog kruga struje za nazivno podešenje regulatora (a) i podešenje za T_{ei} veće od nazivnog iznosa (b)	29
Slika 18.	Usporedba odziva na step pobudu punjenja/pražnjenja regulacijskog kruga struje za bateriju (a) i ultrakondenzator (b)	30
Slika 19.	Usporedba odziva sustava regulacije struje baterije i napona DC međukruga tijekom pražnjenja baterije	31
Slika 20.	Odzivi regulacijskog kruga struje baterije na punjenje srednjom strujom 5 A uz skokovite promjene ± 5 A (a) i srednjom strujom 10 A uz skokovite promjene ± 10 A (b)	32
Slika 21.	Odzivi regulacijskog kruga struje baterije na pražnjenje srednjom strujom -10 A uz skokovite promjene ± 2.5 A (a) i srednjom strujom -10 A uz skokovite promjene ± 5 A (b)	33
Slika 22.	Odzivi regulacijskog kruga struje ultrakondenzatora na punjenje srednjom strujom 1 A uz skokovite promjene ± 1 A (a) i pražnjenje srednjom strujom -1 A uz skokovite promjene ± 1 A (b)	34
Slika 23.	Nadomjesni strujni krug baterije	35

Slika 24.	Analitički rezultati za napon otvorenog kruga ćelije olovne baterije (a), napon na stezaljkama ćelije za vrijeme punjenja/ pražnjenja (b) i unutarnji otpor u ovisnosti o stanju napunjenosti baterije prema [14,15].....	37
Slika 25.	Rezultati bilježenja iznosa napona otvorenog kruga baterije za dva različita iznosa struje pražnjenja baterije	39
Slika 26.	Krivulje pražnjenja baterije	40
Slika 27.	Krivulja ovisnosti količine ispražnjenog naboja o struji pražnjenja	40
Slika 28.	Estimacija parazitskog serijskog otpora	42
Slika 29.	Prikaz plana izvođenja identifikacije elektromotorne sile i unutarnjeg otpora baterije	44
Slika 30.	Mjerni signali i rezultati identifikacije punjenja i pražnjenja za dobro napunjenu bateriju (a) i skoro ispražnjenu bateriju (b)	45
Slika 31.	Sve estimirane točke (neosrednjene) pojedinih vrijednosti R_b i E_b u ovisnosti o ΔQ_b za punjenje (a) i pražnjenje (b)	46
Slika 32.	Statičke mape unutarnjeg otpora i EMS, te pripadajućeg napona polarizacije, dobiveni estimacijom rezultata mjerenja	47
Slika 33.	Rezultati karakterizacije prijelazne pojave napona na stezaljkama baterije poslije punjenja	48
Slika 34.	Rezultati karakterizacije prijelazne pojave napona na stezaljkama baterije poslije pražnjenja	49
Slika 35.	Blokovski dijagram kvazi-statičkog modela baterije sa strujom na ulazu	51
Slika 36.	Usporedba eksperimentalnih odziva sa odzivima simulacijskih modela sa iscrpnijim i osrednjenim statičkim mapama unutarnjeg otpora i napona polarizacije baterije	51
Slika 37.	Krugovi za uravnoteženje ultrakondenzatorskog modula sa dvije serijski spojene ćelije: pasivno (a), djelomično aktivno (b) i aktivno (c) balansiranje.....	53
Slika 38.	Ekvivalentni električni krug ultrakondenzatorskog modula.....	53
Slika 39.	Odzivi ultrakondenzatora na test punjenja/pražnjenja ultrakondenzatora konstantnom strujom	54
Slika 40.	Estimirana kapacitivnost ultrakondenzatora u ovisnosti o naponu	55
Slika 41.	Krivulja samopražnjenja ultrakondenzatorskog modula	56
Slika 42.	Odzivi ultrakondenzatorskog modula na promjenjivi profil struje (a) i rezultati estimacije parametara temeljene na ARX modelu (b)	59
Slika 43.	Rezultati validacije ARX modela ultrakondenzatora.....	59
Slika 44.	Dinamički model ultrakondenzatora: a) model sa naponom na ulazu i b) model sa strujom na ulazu	60
Slika 45.	Simulacijski odzivi modela ultrakondenzatora sa naponom na ulazu (a) i sa strujom na ulazu (b) na punjenje/pražnjenje konstantnom strujom	61

POPIS TABLICA

Tablica 1. Usporedba sustava za skladištenje energije prema gustoći energije, gustoći snage, učinkovitosti i cijeni, [6].....	9
Tablica 2. Životni ciklusi raznih tipova baterija pri različitim nivoima ispražnjenosti (DoD), [6].....	10
Tablica 3. Rezultati procjene vremenske konstante stacioniranja napona baterije po završetku punjenja, odnosno pražnjenja.	49
Tablica 4. Odnosi između parametara vremenski kontinuiranog i vremenski diskretnog modela	57

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	m^2	Efektivna površina izolacijskog sloja ultrakondenzatora
C_0	F	Nadomjesni kapacitet baterije
C_T	F	Parazitska kapacitivnost baterije
C_{dc}	F	Kapacitet DC međukruga
C_u	F	Nadomjesna kapacitivnost (kapacitet) ultrakondenzatora
C_{uc}	F	Kapacitet ultrakondenzatora
D_2, D_3, D_n		Karakteristični odnosi optimuma dvostrukog odnosa
DoD	%	Razina ispražnjenosti baterije/ultrakondenzatora
d	m	Debljina izolacijskog sloja ultrakondenzatora
d		Faktor vođenja DC/DC pretvarača
d_c		Kritična vrijednost faktora vođenja DC/DC pretvarača
E_b	V	Elektromotorna sila baterije
E_u	V	Elektromotorna sila ultrakondenzatora
$e(k)$		Pogreška predikcije ARX modela
f_{ch}	Hz	Frekvencija prekapčanja frekvencijskog pretvarača
$H(k)$		Mjereno korigirano vremenski promjenjivo pojačanje u okviru Kalmanovog filtra
\bar{I}_L	A	Srednja struja trošila
I_L	A	Struja trošila
$I_{L,max}$	A	Maksimalna struja trošila
$I_{L,min}$	A	Minimalna struja trošila
I_d	A	Struja pražnjenja baterije
I_{d0}	A	„Referentna“ struja pražnjenja baterije
I_{max}	A	Maksimalna struja baterije
I_u	A	Konstantna struja ultrakondenzatora
$I_{u,chg}$	A	Konstantna struja ultrakondenzatora prilikom punjenja
$I_{u,dis}$	A	Konstantna struja ultrakondenzatora prilikom pražnjenja
i_b	A	Struja baterije
i_b	A	Struja uravnoteženja ultrakondenzatora
i_{bat}	A	Promjenjiva struja baterije
i_c	A	Struja punjenja
i_{dist}	A	„Poremećajna“ struja pražnjenja
i_{lkg}	A	Struja odtjecanja naboja
i_u	A	Ulazna struja ultrakondenzatora
i_{uc}	A	Struja ultrakondenzatora
i_{um}	A	Mjerena struja ultrakondenzatora

$\mathbf{K}(k)$		Korigirano pojačanje Kalmanovig filtra
K_I	Ω/s	Pojačanje integrirajućeg djelovanja (regulator struje)
K_L	$1/\Omega$	Pojačanje induktiviteta prigušnice i serijskih otpora
K_R	ΩA	Pojačanje proporcionalnog djelovanja (regulator napona)
K_c		Parametar aproksimirane krivulje naboja baterije u ovisnosti o struji
k		Poikertov koeficijent
k		Korak uzorkovanja ARX modela
L_c	H	Induktivitet prigušnice
$\mathbf{P}(k)$		Varijanca parametra greške estimacije Kalmanovog filtra
P_{bat}	W	Zahtjev snage baterije
P_c	W	Zahtjev snage ultrakondenzatora
$P_{max,dc}$	W	Maksimalna snaga baterije prilikom pražnjenja
$P_{max,c}$	W	Maksimalna snaga baterije prilikom punjenja
$\mathbf{Q}(k-1)$		Željena varijanca perturbacija estimiranog parametra pri Kalmanovom filtru
Q_b	C (As)	Mjereni nabojski kapacitet baterije
Q_{bat}	C (As)	Trenutna količina naboja baterije
Q_{max}	C (As)	Maksimalna količina naboja
Q_{uc}	C (As)	Akumulirani naboj ultrakondenzatora
q^{-1}		Jedinica operatora kašnjenja
\hat{R}_b	Ω	Estimat unutarnjeg otpora baterije
R_0	Ω	Otpor na stezaljkama baterije
R_L	Ω	Ukupni opteretni otpor
R_T	Ω	Prijelazni otpor baterije
R_b	Ω	Estimirani unutarnji otpor baterije
R_b	Ω	Balansirajući otpor ultrakondenzatora
R_{cl}	Ω	Parazitski serijski otpor u kabelima laboratorijskog postava
R_i	Ω	Unutarnji otpor baterije
R_{ic}	Ω	Unutarnji otpor baterije za vrijeme punjenja
R_{idc}	Ω	Unutarnji otpor baterije za vrijeme pražnjenja
R_p	Ω	Paralelni otpor baterije uslijed samopražnjenja
R_p	Ω	Paralelni otpor ultrakondenzatora
R_s	Ω	Unutarnji serijski otpor ultrakondenzatora
R_s	Ω	Otpor IGBT sklopki
R_{tot}	Ω	Cjelokupni serijski otpor
$R_{tot,n}$	Ω	Nazivni cjelokupni serijski otpor
R_u	Ω	Estimirani unutarnji otpor ultrakondenzatora
$r(k)$		Varijanca mjerenog šuma pri Kalmanovom filtru
$\bar{r}_{ee}(\kappa T)$		Normalizirana pogreška predikcije autokorelirane funkcije ARX modela ultrakondenzatora
SoC	%	Stanje napunjenosti baterije/ultrakondenzatora

SoC_0	%	„Idealno“ stanje napunjenosti baterije
t	s	Vrijeme trajanja eksperimenta
T	s	Vrijeme uzorkovanja
T_L	s	Vremenska konstanta induktiviteta prigušnice i serijskih otpora
T_Σ	s	Ekvivalentna vremenska konstanta regulacijskog kruga
$T_{\Sigma n}$	s	Nazivna ekvivalentna vremenska konstanta regulacijskog kruga
T_{ch}	s	Vremenska konstanta frekvencijskog pretvarača
T_e	s	Ekvivalentna vremenska konstanta zatvorenog kruga
T_{ei}	s	Vremenska konstanta regulatora struje
$T_{ei,n}$	s	Nazivni iznos vremenske konstante regulatora struje
T_{eu}	s	Vremenska konstanta regulatora napona
T_i	s	Vrijeme dok je sklopka DC/DC pretvarača isključena
T_{par}	s	Parazitska vremenska konstanta
T_u	s	Vrijeme vođenja sklopke DC/DC pretvarača
U_{DC}	V	Ulazni napon DC/DC pretvarača
U_O	V	Izlazni napon DC/DC pretvarača
U_{OC}	V	Napon otvorenog kruga baterije
U_{bat}	V	Konstantni napon na stezaljkama baterije
U_{dc}	V	Napon DC međukruga
U_{dcR}	V	Referentni napon DC međukruga
U_{max}	V	Maksimalni napon na stezaljkama
U_p	V	Napon polarizacije elektrolita
U_{v1}	V	Pad napona na senzoru napona
U_{v2}	V	Pad napona na kontaktima baterije
u_b	V	Mjereni napon na stezaljkama baterije
u_{bat}	V	Promjenjivi napon na stezaljkama baterije
u_{bss}	V	Stabilno stanje napona na stezaljkama baterije po završetku prijelazne pojave nakon punjenja/pražnjenja
$u_{c,max}$	V	Maksimalni napon po ćeliji ultrakondenzatora
u_u	V	Napon na stezaljkama ultrakondenzatora
u_{uc}	V	Napon na ultrakondenzatoru
u_{um}	V	Mjereni napon na stezaljkama ultrakondenzatora
$u_{u,chg}$	V	Napon na stezaljkama ultrakondenzatora prilikom punjenja
$u_{u,dis}$	V	Napon na stezaljkama ultrakondenzatora prilikom pražnjenja
$u_{u,max}$	V	Maksimalni napon na stezaljkama ultrakondenzatora
$u_{u,min}$	V	Minimalni napon na stezaljkama ultrakondenzatora
W_{bat}	J	Energija pohranjena u bateriji
W_{uc}	J	Energija pohranjena u ultrakondenzatoru
Y	A/V	Admitancija ultrakondenzatora

ΔQ_b	Ah	Količina ispražnjenog naboja
ΔU_{drop}	V	Pad napona između senzora napona i kontakata baterije
$\Delta u_u(k)$		Numerička diferencija napona ultrakondenzatora
δ		Empirijski parametar (dobiven testom pražnjenja baterije)
ε	F/m	Dielektrična konstanta izolacijskog sloja ultrakondenzatora
ε		Empirijski parametar (dobiven testom pražnjenja baterije)
θ	K	Trenutna temperatura elektrolita
θ_f	K	Temperatura smrzavanja elektrolita
τ_{ub}	s	Vremenska konstanta prijelaznih efekata napona baterije
Ω_{bw}	Hz	Frekvencijski propusni omjer

SAŽETAK

Intermitentna narav i inherentno promjenjiva razina snage iz obnovljivih izvora energije predstavljaju glavne prepreke njihovom integriranju unutar postojećih konvencionalnih električnih mreža koje zahtijevaju kontinuiranu (i vrlo pouzdanu) dostavu električne energije bez naglih „udara“ u mreži. U cilju poboljšanja pouzdanosti obnovljivih izvora energije i zahtijevane dostupnosti snage, literatura predlaže različite sustave za skladištenje energije poput onih temeljenih na baterijama i ultrakondenzatorima. Stoga ovaj rad najprije daje generalni pregled i usporedbu navedenih sustava za pohranu energije u smislu učinkovitosti, kapitalnih troškova, kapaciteta energije i snage, te njihove pouzdanosti. Potom se rad fokusira na ispitivanje baterija i ultrakondenzatora, pri čemu se najprije opisuje projektiranje regulacijskog sustava laboratorijskog postava baterije/ultrakondenzatora za potrebe eksperimentalne karakterizacije i modeliranja sustava za pohranu energije temeljenih na baterijama i ultrakondenzatorima.

U radu se detaljno opisuju postupci eksperimentalne karakterizacije baterije i ultrakondenzatora, odnosno eksperimentalnog određivanja parametara njihovih nadomjesnih strujnih krugova. Pritom su elektromotorna sila i unutarnji otpor baterije estimirani pomoću Kalmanovog filtra, dok je napon otvorenog kruga određen testovima postupnog pražnjenja baterije, a nabojski kapacitet u ovisnosti o struji pražnjenja određen je testom dubokog pražnjenja. Parametri ultrakondenzatora estimirani su temeljem testova punjenja/pražnjenja konstantnom strujom, te uz odgovarajuću periodičku pobudu (prikladnu za određivanje parametara nadomjesnog vremenski-diskretnog ARX modela). Dobiveni modeli baterije i ultrakondenzatora validirani su usporednim simulacijama na računalu.

1. UVOD

U današnje vrijeme za dobivanje energije uglavnom se koriste tradicionalni izvori energije poput fosilnih ili nuklearnih goriva. Međutim, glavni nedostatak uporabe navedenih izvora energije je negativan utjecaj na okoliš uslijed nusprodukata njihovog korištenja (tijekom crpljenja, obrade, distribucije i eksploatacije). Stoga se današnji trendovi u proizvodnji energije okreću takozvanim obnovljivim izvorima energije, među kojima pored vodne energije, sve veći značaj dobivaju sunčeva energija i energija vjetra. Ovi izvori energije dostupni su širom Zemlje, a utjecaj na okoliš prilikom njihovog iskorištavanja je mali ili nikakav. Međutim, navedene izvore energije nije moguće iskorištavati jednakim intenzitetom tijekom dana (sunce zalazi, zimi su dani kraći, vjetar ne puše cijelo vrijeme istim intenzitetom), odnosno tijekom godine. Stoga se stvorila potreba za skladištenjem energije tijekom vremena povećane proizvodnje energije iz navedenih izvora sa svrhom njenog iskorištavanja u vrijeme kada je proizvodnja smanjena ili privremeno nedostupna. Nadalje, treba imati na umu varijabilan nivo proizvedene energije iz ovih izvora energije pri povezivanju sa sustavima za distribuciju energije, posebice u izoliranim elektroenergetskim sustavima gdje je nužno osigurati znatnu rezervu proizvodnje energije prilikom vršnih opterećenja, što se može postići uključivanjem sustava za skladištenje energije što poboljšava kvalitetu proizvedene električne energije, te istodobno pridonosi značajnom smanjenju troškova prilikom eksploatacije. Sustavi za izravno skladištenje električne energije koji se razmatraju u ovom radu zasnovani na ultrakondenzatorima i baterijama, nalaze sve širu primjenu izvan tradicionalnih primjena kao što su prijenosni uređaji i pričuveni izvori napajanja, te pogoni električnih i hibridnih vozila.

U ovom radu obuhvaćeni su sustavi za pohranu električne energije razmjerno malih snaga, zasnovani na olovnim baterijama i ultrakondenzatorima, a čija primjena može biti pogodna za pričuvu energije u izoliranim DC mikromrežama. Navedeni sustavi za pohranu energije najprije su analizirani u smislu načela rada, uključujući praktične aspekte eksploatacije poput učinkovitosti, kapaciteta energije/snage i pouzdanosti. Potom su razvijeni odgovarajući matematički modeli baterije i ultrakondenzatora s naglaskom na jednostavnost modela i prikladnost za upravljanje regulacijom sustava za skladištenje energije, uključujući nadzor stanja napunjenosti. Rad se nadalje bavi eksperimentalnom identifikacijom prikladnih matematičkih modela baterije i ultrakondenzatora pogodnih za primjene u upravljanju

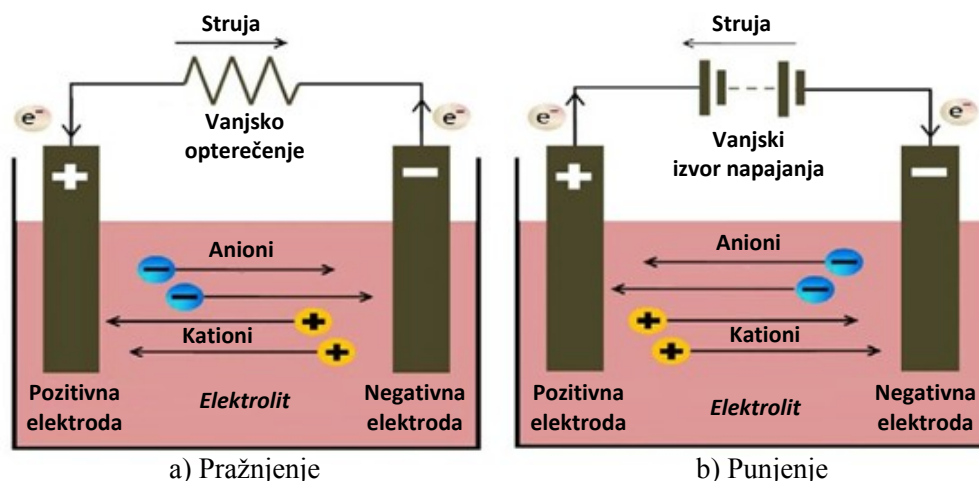
energijom i protokom snaga. U tu svrhu je prethodno projektiran eksperimentalni (laboratorijski) postav za ispitivanje baterija i ultrakondenzatora opremljen DC/DC energetske pretvaračima, te je u radu projektiran prikladan regulacijski sustav koji omogućuje ispitivanje u širokom rasponu radnih režima baterija i ultrakondenzatora. Eksperimentalna identifikacija matematičkih modela baterije i ultrakondenzatora počiva na eksperimentalnoj procjeni parametara kvazi-statičkih modela procesa izvedenih na temelju pripadajućih nadomjesnih strujnih krugova, a koji uključuju efekte unutarnjeg otpora i efekte kapaciteta električnog naboja (kapacitet ultrakondenzatora, odnosno nabojski kapacitet baterije pri pražnjenju). Ovi matematički modeli potom su korišteni za izradu simulacijskih modela pogodnih za primjene u regulaciji, a koji su potom validirani u odnosu na eksperimentalne rezultate.

Rad je koncipiran na slijedeći način. Poglavlje 2 prikazuje različite elektrokemijske baterije kao sustave za skladištenje energije, poput olovnih baterija, baterija baziranih na litiju i niklu, ali i neke naprednije tehnologije poput visoko-temperaturnih ili protočnih baterija. Također su u poglavlju 2 opisani i analizirani ultrakondenzatori kao sustavi za skladištenje energije, te uspoređeni sa baterijama prema temeljnim karakteristikama poput gustoće energije, gustoće snage, cijene, pouzdanosti/izdržljivosti, te dobavljalivosti. Poglavlje 3 opisuje osnovne modele baterija i ultrakondenzatora temeljene na pripadajućim nadomjesnim strujnim krugovima, te iz njih izvedene matematičke modele pogodne za analizu tokova snage. U poglavlju 4 opisan je laboratorijski postav za ispitivanje baterija i ultrakondenzatora Laboratorija za elektrotehniku Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, gdje se između ostalog daje i detaljan opis rada dvo-kvadratnog DC/DC pretvarača, a koji čini jezgru navedenog postava. Projektiranje sustava regulacije struje baterije/ultrakondenzatora i napona DC međukruga opisano je u poglavlju 5. Poglavlje 6 pokazuje identifikaciju modela olovne baterije i ultrakondenzatorskog modula, a što uključuje snimanje karakteristike napona otvorenog kruga baterije, statičke krivulje nabojnog kapaciteta baterije, estimaciju elektromotorne sile i unutarnjeg otpora baterije, te konačno parametara nadomjesnog modela ultrakondenzatora. U poglavlju 6 se, također, nalaze i rezultati validacije simulacijskih modela baterije i ultrakondenzatora. Zaključak je dan u poglavlju 7.

2. BATERIJSKI I ULTRAKONDENZATORSKI SUSTAVI ZA SKLADIŠTENJE ELEKTRIČNE ENERGIJE

2.1. Pregled tehnologija elektrokemijskih baterija

Baterijski sustavi za skladištenje energije pronalaze široku primjenu u različitim sustavima za proizvodnju električne energije karakteriziranim izraženim varijacijama u razini proizvodnje, kao što su hibridna električna vozila i elektroenergetski sustavi sa značajnim udjelom obnovljivih izvora energije (npr. kod izjednačavanja opterećenja i napona električne mreže i regulacije frekvencije), [1]. Njihove glavne prednosti u odnosu na konkurentne sustave poput zamašnjaka i hidropneumatskih sustava za skladištenje energija, leže u relativno malim dimenzijama samog sustava, izostanku pomičnih dijelova (osim kod protočnih baterija) i najvažnije, „direktnom“ skladištenju električne energije (kroz reverzibilne elektrokemijske reakcije). Presjek tipične reverzibilne elektrokemijske ćelije prikazuje [Slika 1.], zajedno s tokovima struje (iona) tijekom punjenja i pražnjenja ćelije. Premda se često koristi termin baterija, osnovni elektrokemijski element se naziva ćelija. Tri osnovna dijela svake elektrokemijske ćelije su negativno nabijena elektroda (anoda), pozitivno nabijena elektroda (katoda) i elektrolit koji služi kao medij za razmjenu iona između elektroda unutar jedne ćelije.



Slika 1. Shematski prikaz elektrokemijske ćelije i događanja u njoj za vrijeme: a) pražnjenja i b) punjenja, [2]

Prilikom pražnjenja baterije negativna elektroda oksidira, a pozitivna elektroda reducira. U slučaju punjivih baterija, elektrode zamijene uloge prilikom punjenja. Tada na

pozitivnoj elektrodi dolazi do oksidacije, a na negativnoj do redukcije. Oksidacija je kemijska reakcija u kojoj dolazi do primanja elektrona, prilikom čega atomi postaju negativno nabijeni ioni (anioni). Redukcija je suprotna reakcija oksidaciji, kod koje dolazi do otpuštanja elektrona prilikom čega atomi postaju pozitivno nabijeni ioni (kationi). Oksidacija i redukcija su poznate pod zajedničkim nazivom redoks-reakcije.

Razina akumuliranog električnog naboja u bateriji obično se izražava bezdimenzijskim koeficijentom koji se naziva stanje napunjenosti, *SoC* (State of Charge). Stanje napunjenosti se može zapisati kao omjer trenutne količine naboja u bateriji (Q_{bat}) i maksimalne količine naboja (Q_{max}) koja može biti pohranjena u bateriji pri određenom nivou ispražnjenosti (struji pražnjenja), kako slijedi:

$$SoC = \frac{Q_{bat}}{Q_{max}} \quad (1)$$

Uz stanje napunjenosti često se koristi i drugi parametar, dubina (razina) ispražnjenosti (*DoD*; Depth of Discharge), koji glasi:

$$DoD = 1 - SoC \quad (2)$$

Prema strukturi elektroda i elektrolita, elektrokemijske baterije dijelimo na nekoliko kategorija:

1. baterije sa tekućim elektrolitom i krutim elektrodama, kao što su olovne (LA), nikal-kadmijeve (Ni-Cd), nikal-metal-hidridne (Ni-MH) i litij-ionske (Li-ion) baterije;
2. baterije sa krutim keramičkim elektrolitom i tekućim (rastaljenim) elektrodama (tzv. visoko-temperaturne baterije), kao što su natrij-sumpor (NaS) i ZEBRA baterije;
3. baterije sa dva međusobno razdvojena elektrolita, koji se kombiniraju unutar takozvane regenerativne gorivne ćelije za vrijeme punjenja i pražnjenja. U ovu skupinu baterija poznatiju kao protočne baterije, pripadaju takozvane vanadij-redoks (VRB), natrij-brom (Na-Br) i cink-brom (Zn-Br) baterije.

Olovne akumulatorske baterije (baterije s olovnim elektrodama i sumpornom kiselinom kao elektrolitom) predstavljaju najstariju i najrazvijeniju tehnologiju punjivih baterija. Glavna prednost im leži u malim troškovima proizvodnje, robusnosti, relativno velikoj gustoći snage prilikom udarnih opterećenja (do 300 W/kg), malom intenzitetu samopražnjenja, te relativno dugom životnom vijeku i općenito dugom životnom ciklusu pri malim do srednjim iznosima ispražnjenja (*DoD*). Glavni nedostaci su im mala gustoća energije (tipično manje od 40 Wh/kg), prilično smanjen životni ciklus za vrlo velike *DoD* (tipično od 600 do 1200 ciklusa),

štetnost za okoliš (koriste se toksični materijali: sumporna kiselina kao elektrolit i olovo za elektrode) i zahtjevi za održavanjem (gubitak vode/vodika u slučaju prepunjenosti). Zahtjevi na održavanje i sigurnost nisu izraženi ako se koriste ventilima regulirane olovne baterije (VRLA). Ovakve baterije su dobro zabrtvljene (ventil je sigurnosna mjera za sprečavanje visokih tlakova), tako da je unutar takve baterije moguća rekombinacija kisika i vodika i smanjen gubitak vode u odnosu na klasične olovne baterije. VRLA baterije su i sigurnije za korištenje jer je kiselina (elektrolit) najčešće imobilizirana (korištenjem pređe od staklenih vlakana, odnosno elektrolita u obliku gela).

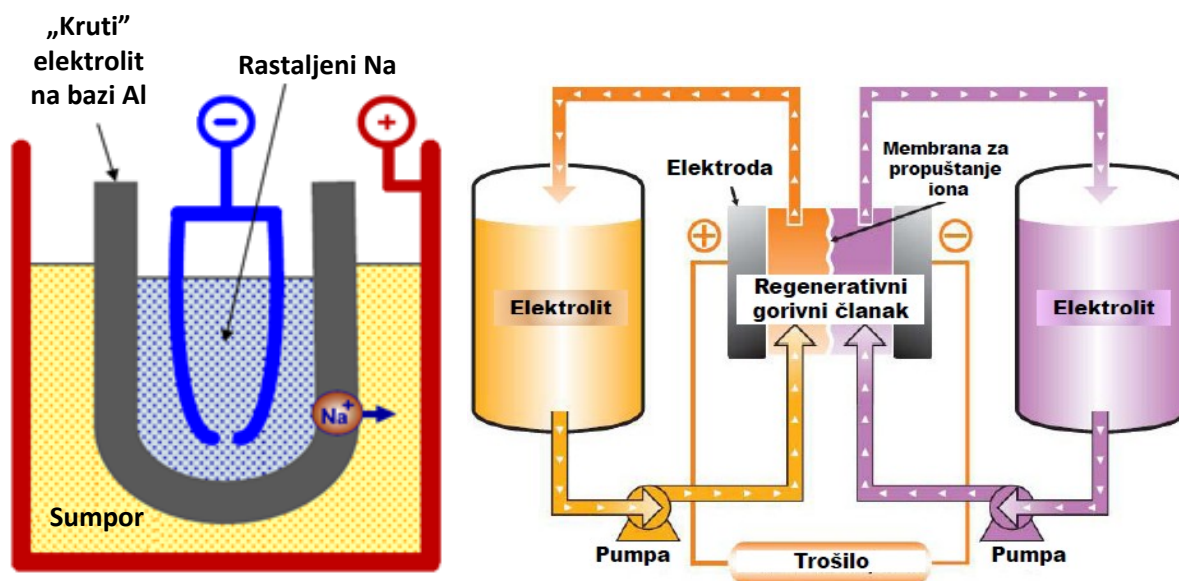
Baterije bazirane na niklu (Ni-Cd i Ni-MH) karakterizirane su s približno dvostruko većom gustoćom energije i snage u odnosu na olovne baterije, a uz značajno veći broj ciklusa sa dubljim djelovanjem pražnjenja (2000 ciklusa prilikom 80% *DoD* i preko 10 000 ciklusa uz 20% *DoD* za Ni-MH baterije). Ni-MH baterije polako istiskuju Ni-Cd baterije, prvenstveno zbog visoke štetnosti kadmija na okoliš, pojave memorijskog efekta koji smanjuje životni vijek ćelija i mogućnosti pojave efekta „termalnog pobjega“ pri niskim temperaturama. Osim toga, Ni-MH baterije su sigurnije i imaju veću gustoću snage. Glavni nedostatak baterija baziranih na niklu je njihovo relativno veliko samopražnjenje i potreba za pripadajućom elektronikom koja kontrolira razinu napunjenosti.

Litij-ionske baterije i njima srodne tehnologije (litijev polimer) karakterizira vrlo kompaktan dizajn i trajnost, što ih čini pogodnima za primjenu u mobilnim uređajima potrošačke elektronike i automobilskim primjenama kao što su utični (plug-in) hibridni električni automobili. Također, imaju vrlo veliku gustoću energije i snage, uz istovremenu otpornost na memorijski efekt, malo samopražnjenje, najveću gustoću struje u usporedbi sa ostalim baterijama i mogu izdržati prilično velik broj ciklusa punjenja i pražnjenja (preko 50 000 ciklusa uz niski *DoD*). Glavni nedostatak ovih baterija su visoki troškovi proizvodnje, koji uključuju sofisticirane upravljačke sustave baterija za zaštitu od prevelike struje i prevenciju otkazivanja zbog prevelikog ili premalog napona.

Visoko-temperaturne baterije zahtijevaju visoku radnu temperaturu, između 270 °C i 350 °C, kako bi se održala reakcija između anode od rastaljenog sumpora i katode na bazi natrija, te visoka vodljivost iona u „krutom elektrolitu“ načinjenom od aluminijske keramike, [Slika 2]. Njezin glavni nedostatak se krije u potrebi za dodatnim izvorom topline kako bi se reakcija započela/održala, te u potrebi za regulacijom temperature pojedinih ćelija, što smanjuje ukupnu efikasnost baterije i zahtjeva učinkovitu toplinsku izolaciju. Njihove prednosti (u odnosu na ostale baterije) su: vrlo visoka gustoća snage i energije (do 120 W/kg i

150 Wh/kg), visoka efikasnost punjenja, mali troškovi, izostanak samopražnjenja tijekom skladištenja (kemijske reakcije se ne mogu odvijati na niskim temperaturama), robusnost i velik broj životnih ciklusa. Sigurnosni i okolišni zahtjevi su vrlo mali jer je baterija kompletno zabrtvljena (posebice ZEBRA baterije koje se razvijaju za automobilske primjene).

Protočne baterije su kompleksni elektrokemijski sustavi sa dva cirkulirajuća elektrolita koji se kombiniraju (reagiraju) u elektrokemijskim redoks reakcijama unutar tzv. regenerativne gorivne ćelije (regenerativnog gorivog članka), [Slika 2]. Ako su elektroliti razdvojeni dok baterija ne radi, neće doći do samopražnjenja, što čini ovaj tip baterije idealnim za dugotrajno skladištenje energije. Ostale prednosti ovakvih baterija su: kapaciteti energije i snage su djelotvorno razdvojeni (iznos snage je ograničen veličinom gorivog članka); kapacitet skladišta energije ovisi samo o veličini spremnika za elektrolit; sposobnost brzog dopunjenja (jednostavnom zamjenom ispražnjenog elektrolita); velik broj životnih ciklusa i dugačak radni vijek (jednostavna zamjena elektrolita i moguće obnavljanje gorivog članka); te, konačno, u mogućnosti potpunog pražnjenja ($DoD = 100\%$) bez negativnih učinaka. Glavni nedostaci ove relativno nove baterijske tehnologije leže u vrlo velikim dimenzijama (zahtijevaju prostor za spremnike i pomoćne crpke) i niskoj specifičnoj gustoći energije (manje od 50 Wh/kg). Ostali problemi se odnose na rad kemijskog postrojenja koje uključuje sustave crpki i spremnika, uz moguć utjecaj na okoliš u slučaju baterija na bazi broma. Izrada ovih baterija za komercijalnu upotrebu trenutno je još uvijek ograničena.

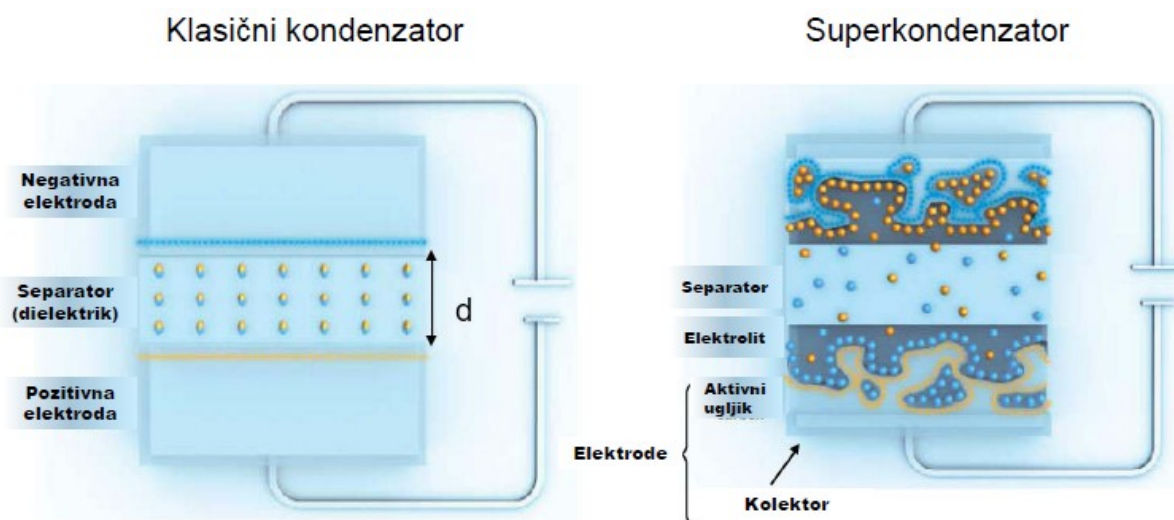


Slika 2. Shematski prikazi konceptata nekih baterijskih tehnologija: lijevo je visokotemperaturna baterija (NaS), [3], a desno protočna baterija, [4]

2.2. Opće karakteristike ultrakondenzatora

Ultrakondenzatori ili kako ih se još naziva superkondenzatori spremaju električnu energiju na isti način kao i obični kondenzatori. Akumulacija energije u kondenzatoru, a tako i ultrakondenzatoru, uključuje nagomilavanje naboja suprotnog polariteta na elektrodama kondenzatora, čime se stvara razlika potencijala između elektroda. Kako je energija uskladištena u kondenzatoru proporcionalna površini elektroda, a obrnuto proporcionalna njihovoj udaljenosti, da bismo povećali količinu uskladištene energije potrebno je povećati površinu elektroda, a smanjiti njihovu udaljenost. O tome se vodilo računa prilikom konstrukcije ultrakondenzatora.

Kod ultrakondenzatora površina elektroda mnogostruko je povećana u odnosu na klasične kondenzatore primjenom poroznih elektroda, koje su uglavnom građene od nanočestica grafita ili isprepletenih ugljičnih nanocjevčica u međusobnom električnom kontaktu, a koje su presvučene nanometarskim slojem izolatora i uronjene u elektrolit. Dipolni sloj formira se u vrlo tankom sloju, između plohe nanočestice i elektrolita. Za razliku od baterije, ultrakondenzatori mogu razviti veliku snagu i imati gotovo neograničen broj ciklusa punjenja-pražnjenja (tipično se navodi brojka od preko 500 000 ciklusa punjenja i pražnjenja [5]). Usporedba principa rada ultrakondenzatora i klasičnog kondenzatora prikazana je putem shematskih prikazuju [Slika 3].



Slika 3. Shematski prikaz razlike u strukturi između klasičnog kondenzatora i superkondenzatora, [4]

Kapacitet ultrakondenzatora prikazuje se jednadžbom:

$$C_{uc} = \epsilon \frac{A}{d} \quad (3)$$

gdje je ε dielektrična konstanta izolacijskog sloja, A je efektivna površina i d je debljina izolacijskog sloja. Kako se koriste nanoporozni materijali, efektivna površina je jako velika a debljina izolacijskog sloja jako mala, specifična kapacitivnost ultrakondenzatora može narasti do 650 F/g i 1300 F/cm³. Energija akumulirana u ultrakondenzatoru proporcionalna je akumuliranom naboju Q_{uc} :

$$W_{uc} = \frac{Q_{uc}^2}{2C_{uc}} \quad (4)$$

Kako stanje napunjenosti ultrakondenzatora izravno ovisi o akumuliranom naboju ultrakondenzatora Q_{uc} , energija pohranjena u ultrakondenzatoru se može zapisati na sljedeći način:

$$W_{uc} = \frac{SoC^2Q_{max}^2}{2C_{uc}} \quad (5)$$

gdje je Q_{max} maksimalni nabojni kapacitet ultrakondenzatora, koji je određen maksimalnim naponom na stezaljkama U_{max} ($Q_{max} = C_{uc}U_{max}$) i iznosom kapaciteta C_{uc} .

Ultrakondenzatore karakteriziraju sljedeće prednosti u odnosu na baterije:

1. dugačak životni vijek uz male gubitke kapacitivnosti (preko 10⁶ ciklusa uz gubitke od 20% kapacitivnosti za vrijeme životnog vijeka), sposobnost potpunog pražnjenja bez opasnosti od redukcije životnog vijeka (efektivnog broja iskoristivih ciklusa punjenja i pražnjenja), te mali zahtjevi za održavanjem;
2. visoka efikasnost (do 95%) zbog izostanka elektrokemijskih reakcija;
3. velika gustoća snage (od 400 W/kg do 3000 W/kg), uz male dimenzije uređaja i mogućnošću brzog ispražnjenja.

Uz navedene prednosti ultrakondenzatori imaju i određene nedostatke:

1. ograničen kapacitet i nisku gustoću energije (samo oko 5 Wh/kg i 10 kWh/m³) zbog malog radnog napona ultrakondenzatorskih ćelija ($U_{uc} < 3.6$ V), potrebnog kako bi se izbjeglo razlaganje elektrolita i s time povezano oštećenje ćelije;
 2. visoka cijena uređaja s obzirom na količinu moguće uskladištene energije, koji se kreću od 1800 EUR/kWh do 7500 EUR/kWh;
 3. visoko varirajući napon ultrakondenzatora prilikom njegovog punjenja/pražnjenja
- $$u_{uc}(t) = C_{uc}^{-1} \int i_{uc}(t) dt.$$

Ograničenja napona mogu se riješiti spajanjem ultrakondenzatora u seriju, dok se varijacije napona mogu ublažiti uz kontrolu izlaznog napona ultrakondenzatorskog sustava pomoću DC/DC pretvarača (vidi Poglavlje 5).

2.3. Usporedba prema temeljnim karakteristikama

Usporedba gustoće energije, gustoće snage i učinkovitosti različitih tipova baterija prikazuje [Tablica 1]. Iz priloženih podataka vidljivo je da litij-ionske baterije i njima srodne baterije imaju najveću gustoću energije i snage. Visoko temperaturne baterije pokazuju dobar omjer dobivene snage i energije. Olovne baterije i baterije na bazi nikla su prikladne za kratkotrajno opskrbljivanje energijom (relativno niska specifična gustoća energije). Također je vidljivo da ultrakondenzator (UC) ima puno veću gustoću snage u odnosu na baterije, ali isto tako i manji iznos gustoće energije što ga čini nepovoljnim za skladištenje velike količine energije. Kompaktnost sustava za skladištenje energije, baš kao i energetska učinkovitost su važan faktor pri konstruiranju sustava za skladištenje energije, naročito za primjenu kod prenosivih uređaja, izoliranih energetskih sustava i ugradnju u urbanoj okolini. Li-ion i NaS baterije imaju najveći kapacitet pohrane energije uz zadovoljavajuće dimenzije i učinkovitost. Drugi tipovi baterija pretežno su veći i teži za istu količinu pohranjene energije, naročito protočne baterije.

Tablica 1. Usporedba sustava za skladištenje energije prema gustoći energije, gustoći snage, učinkovitosti i cijeni, [6]

Vrsta sustava za skladištenje energije	LA	Ni-Cd, Ni-MH	Li-ion	NaS	FB	UC
Gustoća energije, [Wh/kg]	20 - 40	40 - 80	100 - 200	100 - 150	30 - 50	5
Gustoća snage, [W/kg]	do 300	140 - 220	250 - 1000	150	80 - 150	400 - 3000
Učinkovitost, [%]	72 - 78	72 - 78	>95	85 - 89	75 - 85	95
Cijena sustava po jedinici kapaciteta uskladištene energije, [EUR/kWh]	50 - 150	200 - 600	700 - 1000	150 - 370	170 - 550	1800 - 7500
Troškovi po ciklusu punjenje/praznjenje, [EUR/kWh]	0.2 - 1	0.18 - 1	0.15 - 1	0.09 - 0.3	0.05 - 0.9	-

Usporedba cijena se temelji na troškovima uloženim pri pohranjivanju energije i životnom ciklusu. Najmanje troškove po ciklusu imaju NaS baterije i protočne baterije koje imaju i relativno malu cijenu same baterije što se vidi iz [Tablica 1], dobra ciklička svojstva (mogu izdržati veliki broj ciklusa punjenja i praznjenja) i mogućnost produženja vijeka trajanja (isplativo samo u slučaju protočnih baterija). Olovne, Ni-Cd i litijeve baterije imaju puno veće troškove po ciklusu punjenja/praznjenja, uz što se posebno ističu loša ciklička svojstva kod olovnih baterija i visoka nabavna cijena baterija baziranih na niklu i litiju. Ultrakondenzatore karakterizira visoka cijena uređaja po jedinici pohranjene energije, ali i

niski troškovi po ciklusu punjenja/pražnjenja. Valja napomenuti da cijena ultrakondenzatora ubrzano opada: cijena ultrakondenzatora kapaciteta 3000 F 2000. godine bila je oko 2260 EUR, dok je 2011. bila svega 38 EUR, kako stoji u [7].

Dobavljalivost olovnih, Ni-Cd/Ni-MH i Li-ion baterija nije upitna jer se ove baterije baziraju na provjerenim i dobro razvijenim tehnologijama, koje se mogu lako prilagoditi za relativno široko područje potrebnih snaga i energija. NaS baterije, iako dobro razvijene i provjerene u elektroenergetskim primjenama, nisu lako dobavljive zbog ograničenog broja proizvođača. Protočne baterije se još uvijek intenzivno razvijaju, a njihova proizvodnja se odvija u relativno malom broju tvornica, zbog čega je njihova dostupnost u komercijalnim sustavima ograničena.

Životni ciklus baterije definira se kao ukupan broj svih ciklusa punjenja/pražnjenja do određenog konstantnog nivoa ispražnjenosti (*DoD*). Za uspoređivanje životnih ciklusa baterija uzeti su podaci iz dostupne literature, gdje se pod visokom razinom ispražnjenja misli na 75% *DoD* i više, a pri niski do srednji na 20-60% *DoD*. Podaci koje daje [Tablica 2] ukazuju da je ukupan broj ciklusa punjenja i pražnjenja baterije značajno smanjen ako se baterija prazni do visokog iznosa *DoD*, prilikom čega dolazi do ubrzanog starenja (propadanja) elektroda i elektrolita. S druge strane, životni vijek baterije se može znatno produžiti izbjegavanjem dubokih ispražnjenja (uz nisku razinu *DoD*), ali to zahtijeva korištenje predimenzioniranih baterijskih sustava. Današnji komercijalni ultrakondenzatori mogu podnijeti milijun ciklusa [5] (iako se navode iznosi i do 20 milijuna ciklusa), pri čemu se tipično dolazi do pada kapaciteta do maksimalno 20% tijekom eksploatacije od 10 godina, uz predviđeni vijek trajanja 20 godina [7].

Tablica 2. Životni ciklusi raznih tipova baterija pri različitim nivoima ispražnjenosti (*DoD*), [6]

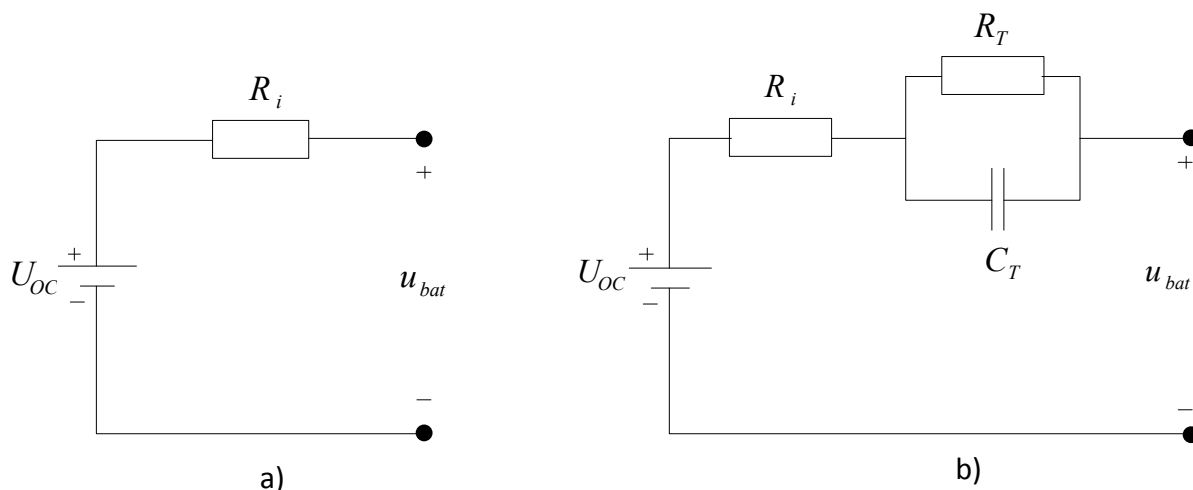
Vrsta baterije	Visoki <i>DoD</i>	Niski/Srednji <i>DoD</i>
LA	600 – 1200 (80% <i>DoD</i>)	2000 (40% <i>DoD</i>) / 4000 (20% <i>DoD</i>)
NaS	2500 (100% <i>DoD</i>) / 4500 (90% <i>DoD</i>)	6500 (65% <i>DoD</i>) / 40000 (20% <i>DoD</i>)
Ni-Cd	1500 – 3000 (80% <i>DoD</i>)	10000 (20-30% <i>DoD</i>)
Ni-MH	2000 (80% <i>DoD</i>)	>10000 (20% <i>DoD</i>)
Li-ion	2500 (80% <i>DoD</i>)	50000 (20-30% <i>DoD</i>)
FB	2000 (100% <i>DoD</i>) / 10000 (75% <i>DoD</i>)	-

3. STANDARDNI MODELI ELEKTROKEMIJSKIH BATERIJA I ULTRAKONDENZATORA

3.1. Standardni modeli nadomjesnih strujnih krugova za elektrokemijske baterije

Mnogo je različitih modela električnih baterija baziranih na nadomjesnim strujnim krugovima. Modeli su razvijani u svrhu opisivanja punjenja i pražnjenja baterije, gubitaka snage, termalnih efekata i starosti baterije. Neki od njih će se prikazati u ovom poglavlju. Modeli će se prikazati od onih jednostavnijih prema složenijima koji su potrebni za daljnja razmatranja u ovom radu.

[Slika 4.,a] prikazuje najčešće korišten i najjednostavniji model je takozvani „Jednostavni model baterije“¹. Taj model prikazuje bateriju kao serijski spoj idealnog istosmjernog naponskog izvora napona otvorenog kruga U_{OC} , i unutarnjeg otpora baterije, R_i . Model je linearan i podrazumijeva da su mu napon izvora i unutarnji otpor konstantne veličine, što kod realnih baterija nije slučaj. Kod realnih baterija te veličine su ovisne o stanju napunjenosti baterije, temperaturi, starenju i drugim efektima. Model je primjenjiv jedino za potrebe izrade jednostavnih simulacijskih modela baterija (gdje se pretpostavlja praktički neograničena količina pohranjene energije u odnosu na zadani ciklus opterećenja, odnosno ako se u modelu smije zanemariti ovisnost parametara strujnog kruga o stanju napunjenosti baterije).

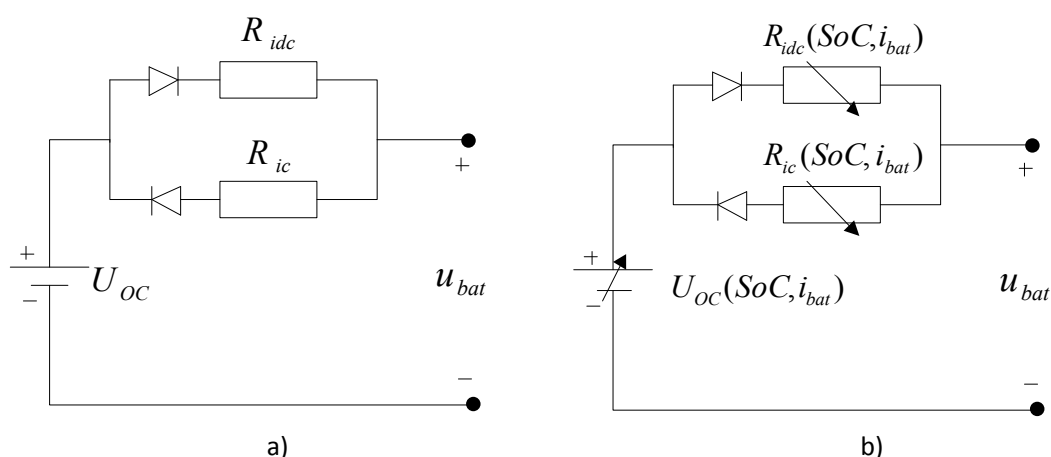


Slika 4. Nadomjesni strujni krugovi elektrokemijskih baterija: a) „Jednostavni model baterije“, b) „Theveninov model baterije“

¹ Eng. Simple Battery Model

Drugi često korišten model baterija naziva se „Theveninov model baterije“ prikazuje [Slika 4,b]. Model je sastavljen od idealnog izvora napona otvorenog kruga, U_{OC} , unutarnjeg otpora, R_i , i paralelnog RC spoja parazitske kapacitivnosti, C_T , i prijelaznog otpora, R_T . RC spoj predstavlja fizikalne komponente; C_T predstavlja kapacitivnost paralelnih ploča baterije, a R_T predstavlja nelinearni otpor izazvan kontaktom ploča i elektrolita. Problem ovog modela je u zahtjevu da svi elementi imaju konstantne iznose parametara, što kod realnih baterija nije slučaj (općenito ovise o trenutnom stanju napunjenosti baterije).

„Otpornički Theveninov model baterije“ slijedeći je u nizu korištenih modela baterije. Napravljen je na osnovi prethodnog modela zanemarivanjem kapacitivnih efekata. Sastoji se od dva paralelna otpora od kojih svaki stoji spojen u seriju sa međusobno protuparalelnim idealnim diodama, kao što prikazuje [Slika 5,a]. U nadomjesnom strujnom krugu diode simboliziraju smjer tijeka struje, odnosno uključenje/isključenje pojedinih otpornika iz strujnog kruga, ovisno da li se radi o punjenju ili pražnjenju baterije. Dakle, model je sačinjen od napona otvorenog kruga, U_{OC} , unutarnjeg otpora prilikom pražnjenja baterije, R_{idc} i unutarnjeg otpora prilikom punjenja baterije, R_{ic} . Oba otpora predstavljaju radne gubitke energije. Idealne diode služe samo za potrebe modeliranja, što znači da na njima nema pada napona kada su propusno polarizirane. Model također ne uzima u obzir ovisnost parametara o SoC , što je nedostatak.



Slika 5. Nadomjesni strujni krugovi elektrokemijskih baterija: a) „Otpornički Theveninov model baterije“, b) kvazi-statički model baterije preporučeni u literaturi [6] i [8]

Kada se uzme u obzir ovisnost elemenata o stanju napunjenosti baterije, dobije se modificirani kvazi-statički model baterije, prikazuje [Slika 5,b]. Kod ovoga modela U_{OC} , R_{idc} ,

R_{ic} se mijenjaju ovisno o stanju napunjenosti (SoC) baterije. Uvođenje različitih parametara za punjenje i pražnjenje baterija potrebno je jer se kod nekih tipova baterija (naročito kod baterija na bazi nikla i litija) javlja histereza napona na stezaljkama prilikom punjenja i pražnjenja baterije. Ovakav model preporučuje se u literaturi [6] i [8], te će se koristiti u daljnjoj analizi.

3.2. Matematički modeli elektrokemijskih baterija

Akumulirana energija u bateriji je definirana prema:

$$W_{bat} = \int_0^T u_{bat}(SoC, i_{bat}) i_{bat} dt \quad (6)$$

gdje je u_{bat} napon na stezaljkama baterije, a i_{bat} struja baterije.

Za približno konstantan napon na stezaljkama baterije ($u_{bat} = U_{bat}$), jednačba (6) se može zapisati kao:

$$W_{bat} \cong U_{bat} \int_0^T i_{bat} dt \quad (7)$$

Kako je iz osnovnih zakonitosti elektrotehnike poznato, količina sakupljenog naboja se izražava kao $Q_{bat} = \int i_{bat} dt$, a iz jednačbe (1) vrijedi $Q_{bat} = SoC \cdot Q_{max}$, uvrštavanjem navedenih izraza u (7) dobiva se izraz za W_{bat} :

$$W_{bat} = U_{bat} \cdot SoC \cdot Q_{max} \quad (8)$$

Na osnovi dinamičkog modela stanja napunjenosti baterije (SoC) zasnovanog na jednačbi (1) vrijedi:

$$\frac{dSoC}{dt} = \frac{1}{Q_{max}} \frac{dQ_{bat}}{dt} = \frac{i_{bat}}{Q_{max}} \quad (9)$$

Za dobivanje izraza je korištena ranije navođena relacija za količinu sakupljenog naboja, samo u obliku $i_{bat} = dQ_{bat}/dt$.

Prema jednačbi ravnoteže napona u električnom krugu prikazanom na [Slika 5,b], slijedi:

$$u_{bat} = i_{bat} R_i + U_{OC} \quad (10)$$

Prema jednačbama (8), (9) i (10) mogu se izvesti različiti modeli baterije, ovisno o veličini na ulazu modela. Ako je na ulazu napon baterije (u_{bat}) model je pogodniji za

simulacijsku analizu stanja napunjenosti (SoC), [Slika 6,b], a ako je na ulazu struja baterije (i_{bat}) model je pogodniji za konstruiranje estimatora stanja napunjenosti (za on-line nadziranje stanja napunjenosti), [Slika 6,a].

Na osnovu kvazi-statičkog modela baterije može se izvesti i model baziran na protoku snage koji je pogodan za upravljanje energijom, [Slika 6,c]. Model protoka snage baterije se bazira na odnosima valjanim za ekvivalentni krug kako prikazuje [Slika 5,b] (uz pretpostavku pozitivnog predznaka snage i struje baterije u slučaju punjenja):

$$P_{bat} = u_{bat} \cdot i_{bat} = i_{bat}^2 R_i(SoC, i_{bat}) + U_{OC}(SoC, i_{bat}) i_{bat} \quad (11)$$

Kombiniranjem gornje jednačbe i modela stanja napunjenosti (9), nakon sređivanja jednačbe dobije se model baterije baziran na protoku snage:

$$\frac{dSoC}{dt} = \frac{\sqrt{U_{OC}^2(SoC, i_{bat}) + 4R_i(SoC, i_{bat})P_{bat}} - U_{OC}(SoC, i_{bat})}{2Q_{max} R_i(SoC, i_{bat})} \quad (12)$$

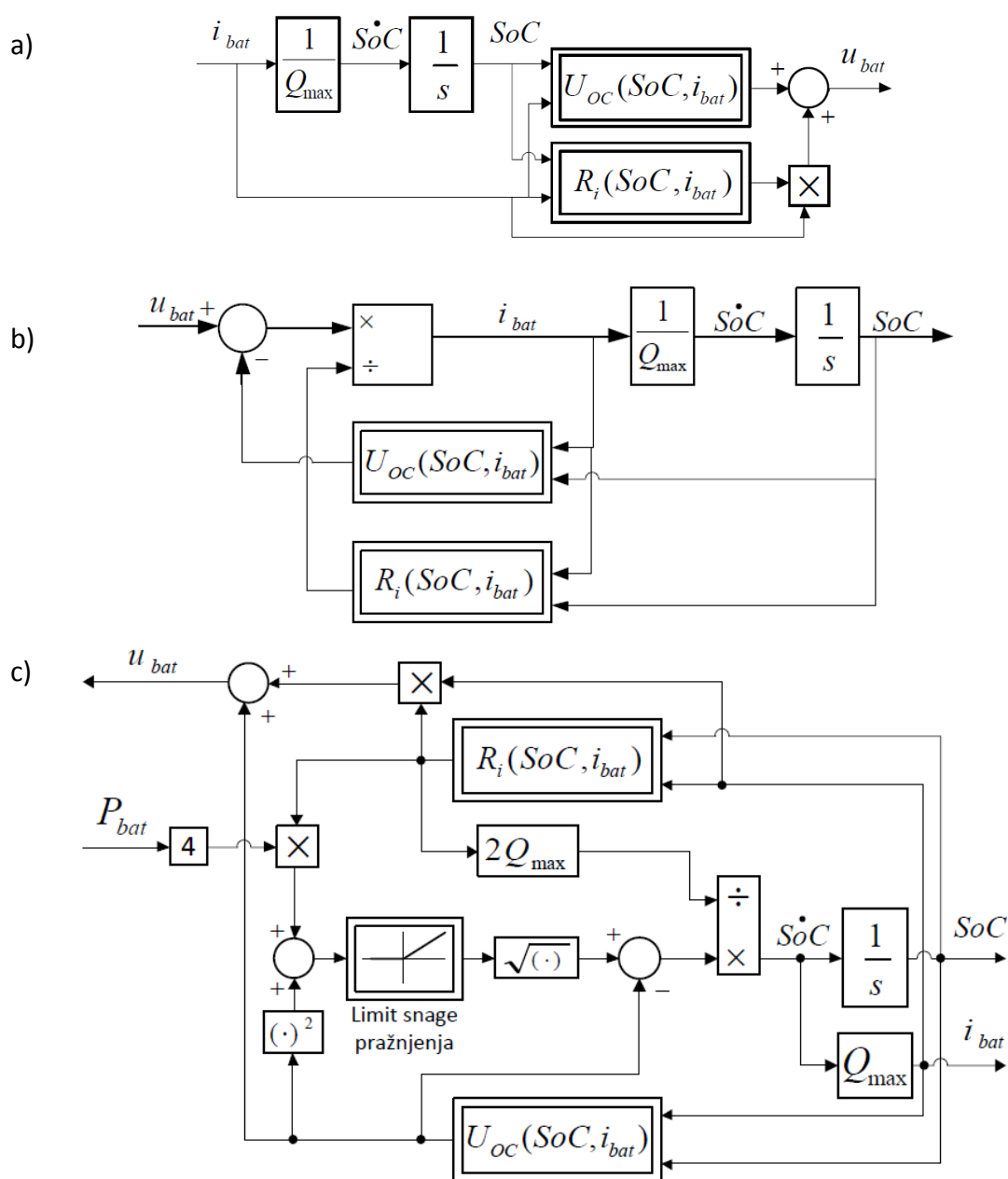
Model također treba sadržavati efikasan način limitiranja količine pražnjenja baterije za nerealne slučajeve kada snaga pražnjenja baterije zahtijeva apsolutni iznos $|P_{bat,dc}|$ koji će postati veći od najveće teoretske razine pražnjenja za pojedini nivo napunjenosti (SoC) baterije:

$$|P_{max,dc}| = \frac{U_{OC}^2}{4R_{idc}} \quad (13)$$

Limit snage punjenja baterije je ovisan o maksimalnom naponu na stezaljkama, U_{max} , i maksimalnoj struji baterije, I_{max} , prema slijedećem odnosu:

$$P_{max,c} < \frac{[U_{max}(SoC) - U_{OC}(SoC)]U_{max}(SoC)}{R_{idc}(SoC)} = I_{max} U_{max} \quad (14)$$

Limiti struje i napona (I_{max} i U_{max}) trebaju biti implementirani u DC/DC pretvaraču koji se koristi za punjenje/pražnjenje baterije.

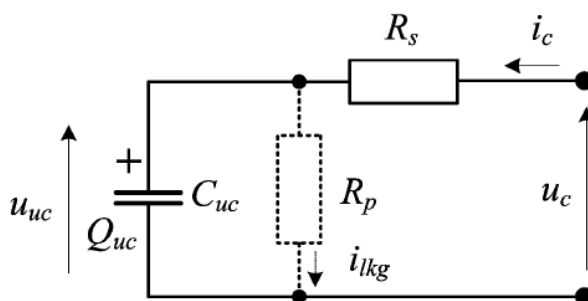


Slika 6. Blokovski dijagrami baterija: a) sa strujom baterije na ulazu modela, b) sa naponom baterije na ulazu modela, c) model baziran na protoku snaga

3.3. Standardni modeli nadomjesnih strujnih krugova za ultrakondenzatore i pripadajući matematički modeli

Ultrakondenzatorski sustav za pohranu energije sa obično modelira pomoću otporničko-kondenzatorskog električnog kruga (RC kruga) kako pokazuje [Slika 7]. Model uključuje Kapacitivnost ultrakondenzatora C_{uc} i unutarnji serijski otpor R_s koji predstavlja ukupne toplinske gubitke snage tijekom pražnjenja/punjenja. Samopražnjenje ultrakondenzatora zbog

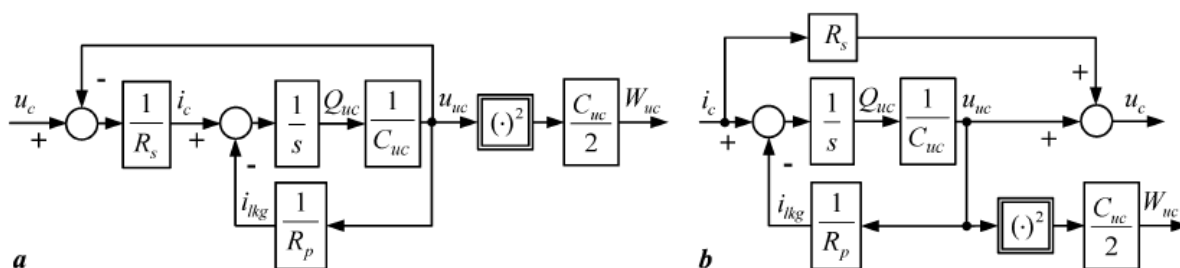
neidealnog izolacijskog sloja se modelira pomoću paralelnog otpora R_p (odnosno pripadajuće struje odtjecanja naboja i_{lkg}). Treba imati na umu da za slučajeve čestog punjenja i pražnjenja, efekt samopražnjenja može biti zanemaren (obično $i_{lkg} \ll i_c$), stoga paralelni otpor R_p može biti izostavljen iz modela sa [Slika 7].



Slika 7. Ekvivalentni strujni krug ćelije ultrakondenzatora, [6]

Ranije predstavljena shema ultrakondenzatora može se prikazati kao dinamički model u obliku blokovskog dijagrama. Ovisno o ulaznoj veličini mogu se razmatrati dva različita modela. Model kojem je na ulazu napon pogodniji je za simulacijsku analizu kontrole punjenja/pražnjenja ultrakondenzatora, dok je model sa strujom na ulazu praktičniji za nadzor stanja napunjenosti u realnom vremenu („on-line“) i u svrhu projektiranja estimatora stanja napunjenosti.

Modeli se sastoje od jednadžbe (4) za energiju uskladištenu u ultrakondenzatoru, Kirchhoffovih zakona primijenjenih na shemu ekvivalentnog strujnog kruga ćelije ultrakondenzatora [Slika 7] i jednadžbe za količinu sakupljenog naboja. Kombinacijom tih jednadžbi, dobiju se modeli od kojih su izrađeni blokovski dijagrami kako iznosi [Slika 8].



Slika 8. Modeli ultrakondenzatora prema shemi nadomjesnog strujnog kruga sa naponskim ulazom (a) i strujnim ulazom (b)

Na osnovi pretpostavke da je odtjecanje naboja (curenje) zanemarivo ($i_{kg} = 0$), model ultrakondenzatorskog sustava skladištenja energije baziran na protoku snaga može se izvesti pomoću jednadžbi ravnoteže energije:

$$P_c = \frac{dW_{uc}}{dt} + i_c^2 R_s = \frac{d}{dt} \left(\frac{Q_{uc}^2}{2C_{uc}} \right) + i_c^2 R_s = \frac{dQ_{uc}}{dt} \frac{Q_{uc}}{C_{uc}} + \left(\frac{Q_{uc}}{dt} \right)^2 R_s \quad (15)$$

gdje je P_c zahtjev snage ultrakondenzatora ($P_c > 0$ prilikom punjenja i $P_c < 0$ prilikom pražnjenja).

Kombinacijom jednadžbe (15) sa ranije spominjanom dinamičkom jednadžbom stanja napunjenosti (9), dobije se rješenje jednadžbe ravnoteže energije u obliku koji podsjeća na odgovarajući dinamički model baterije:

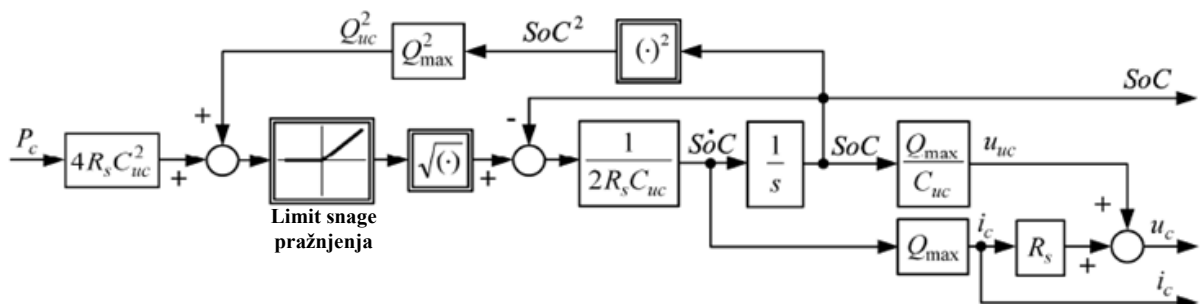
$$\frac{dSoC}{dt} = \frac{1}{Q_{max}} \frac{dQ_{uc}}{dt} = \frac{\sqrt{Q_{uc}^2 + 4R_s C_{uc}^2 P_c} - Q_{uc}}{2R_s C_{uc} Q_{max}} = \frac{\sqrt{SoC^2 Q_{max}^2 + 4R_s C_{uc}^2 P_c} - SoC}{2R_s C_{uc}} \quad (16)$$

Blokovski dijagram dinamičkog modela ultrakondenzatorskog sustava za skladištenje energije napravljen je kako prikazuje [Slika 9]. Model je napravljen na takav način da daje napon na stezaljkama i struju nabijanja/izbijanja. Model uključuje i blok za limitiranje snage pražnjenja za slučaj kada snaga pražnjenja premašuje maksimalnu razinu pražnjenja ultrakondenzatora, tj. kada je $|P_{max,dc}| < Q_{uc}^2 / 4C_{uc}^2 R_s$ (inherentno svojstvo ultrakondenzatorske baterije).

Limit punjenja ultrakondenzatorskog sustava ovisi o maksimalnoj struji I_{max} i naponu na stezaljkama ultrakondenzatora:

$$P_{max,c} < u_c I_{max} \approx \left(\frac{Q_{uc}}{C_{uc}} + I_{max} R_s \right) I_{max} \quad (17)$$

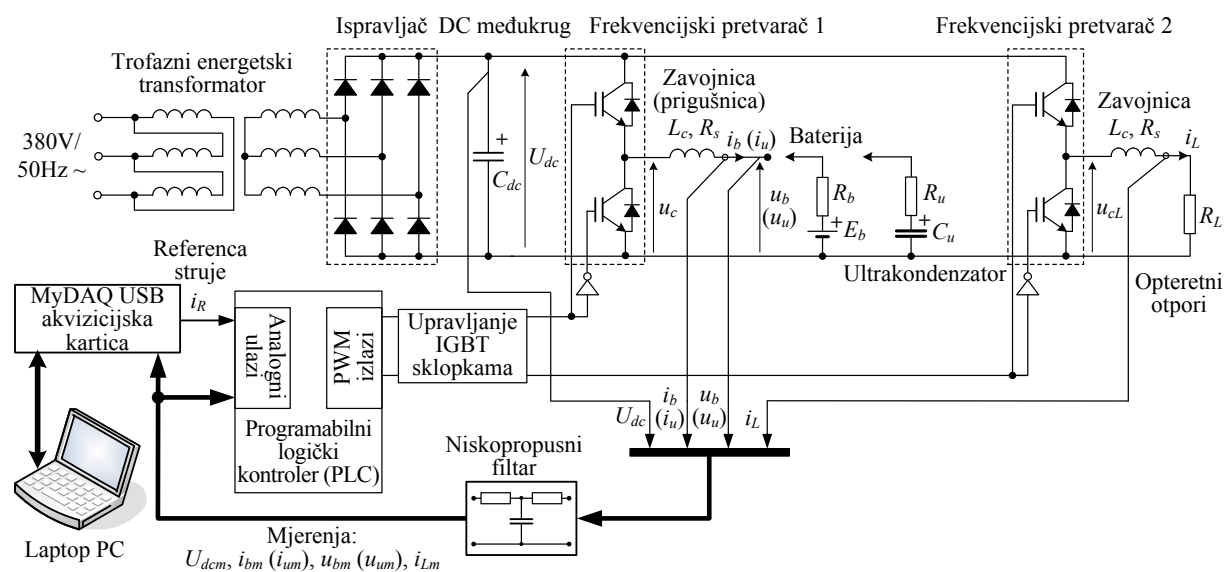
Kao i kod baterije, ovaj limit snage je obično ugrađen u DC/DC pretvarač.



Slika 9. Blokovski dijagram dinamičkog modela ultrakondenzatora baziran na protoku snage

4. EKSPERIMENTALNI POSTAV ZA ISPITIVANJE BATERIJA I ULTRAKONDENZATORA

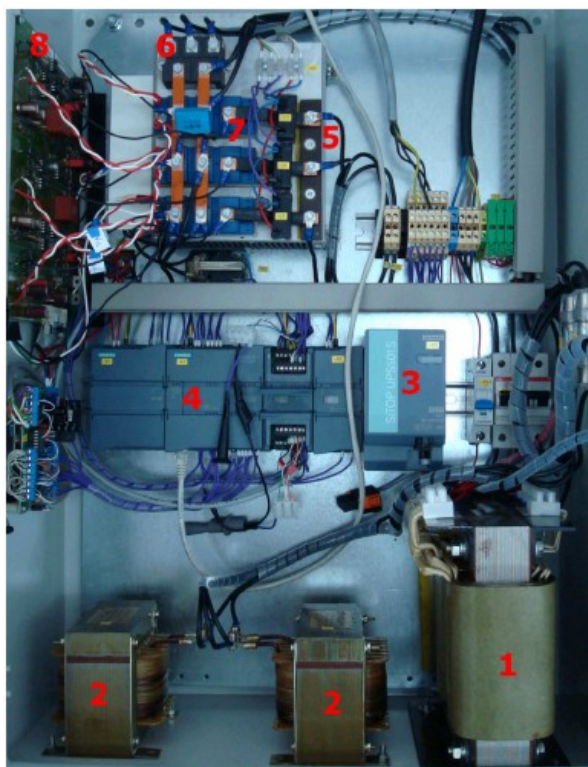
Testni postav za ispitivanje baterija i ultrakondenzatora, razvijen je u sklopu projekta HRZZ „Optimiranje sustava obnovljivih izvora električne energije povezanih u mikromrežu - MICROGRID“ za potrebe eksperimentalne karakterizacije i modeliranja sustava za skladištenje energije baziranih na baterijama i ultrakondenzatorima, kao što su standardne automobilske olovne baterije, napredne automobilske baterijske ćelije (Li-ion i LiFePO₄ baterijski sustavi) i niskonaponski ultrakondenzatorski moduli. Tako dobiveni (razvijeni) modeli baterija i ultrakondenzatora se mogu koristiti kao osnova za estimaciju stanja napunjenosti (*SoC*) ili regulaciju punjenja/pražnjenja baterija u svrhu produljenja životnog vijeka ili povećanja energetske učinkovitosti, uključujući namjensko upravljanje baterijama i srodne strategije nadzora njihovog rada.



Slika 10. Principna shema laboratorijskog postava za ispitivanje baterija i ultrakondenzatora

Testni postav za ispitivanje baterija i ultrakondenzatora se nalazi u laboratoriju za elektrotehniku Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Principna shema postava predočava [Slika 10]. Jezgru sustava sačinjavaju dva dvo-kvadratna silazno-uzlazna DC/DC pretvarača (čiji princip rada je detaljnije opisan u sljedećem podpoglavlju) implementirana s IGBT tranzistorima („Insulated Gate Bipolar Transistor“, bipolarni tranzistori s izoliranom upravljačkom elektrodom), a koji su upravljani relativno jednostavnim (jeftinim) programabilnim logičkim kontrolerom (PLC) opremljenim s prekidačkim PWM („Pulse-

width modulation“) izlazi (radne frekvencije prekapčanja $f_{ch} = 1$ kHz). Komponente pretvarača su predviđene da podnesu konstantnu struju iznosa 25 A (35 A vršne struje). Sustav ispravljač/DC međukrug opremljen je s „baterijom“ elektrolitskih kondenzatora kapaciteta 40 mF dimenzioniranih za napon DC međukurga od približno 40 V, a koji osigurava do 1 kW kontinuirane snage za svaki pretvarač. Svaki DC/DC pretvarač snage opremljen je odgovarajućom zavojnicom (prigušnicom) induktiviteta $L_c = 0.7$ mH u svrhu smanjenja valovitosti struje (izgladivanja). Frekvencijski pretvarač u grani baterije/ultrakondenzatora može raditi i u silaznom i u uzlaznom načinu rada što uvelike olakšava regulaciju struje prilikom punjenja i pražnjenja baterije/ultrakondenzatora. Drugi frekvencijski pretvarač koristi se za regulaciju napona DC međukruga za vrijeme pražnjenja baterije/ultrakondenzatora, gdje se višak energije troši na vanjskom sklopu sastavljenom od šest otpornika snage ($2.2 \Omega / 200$ W) spojenih u paralelu (rezultira ukupnim opteretnim otporom $R_L = 0.367 \Omega$). [Slika 11] pokazuje fotografiju unutrašnjosti razvodnog ormara pretvarača snage (uključujući i ultrakondenzatorski modul) i pridruženog upravljačkog hardvera.



Legenda: 1 – trofazni energetski pretvarač, 2 – zavojnice (prigušnice), 3 – ultrakondenzatorski modul, 4 – PLC, 5 – senzori struje, 6 – ispravljač, 7 – IGBT sklopke, 8 – IGBT upravljačka pločica

Slika 11. Fotografija unutrašnjosti razvodnog ormara pretvarača snage sa pridruženim upravljačkim hardverom

Funkcionalnost postava također obuhvaća mjerenje napona na stezaljkama baterije/ultrakondenzatora u_b (u_u) i pripadajuće struje i_b (i_u), koja se mjeri Hallovim senzorima struje. Omogućeno je i mjerenje napona DC međukruga, te struje opterećenih otpora za potrebe regulacije i dijagnostike u realnom vremenu. Ranije spomenuti mjerni signali se propuštaju kroz pasivne niskopropusne RC filtre kako bi se potisnuo šum izazvan prekidačkim djelovanjem DC/DC pretvarača ($f_{ch} = 1$ kHz) i izbjegao aliasing efekt prilikom uzorkovanja mjernih signala vremenom uzorkovanja $T = 4$ ms.

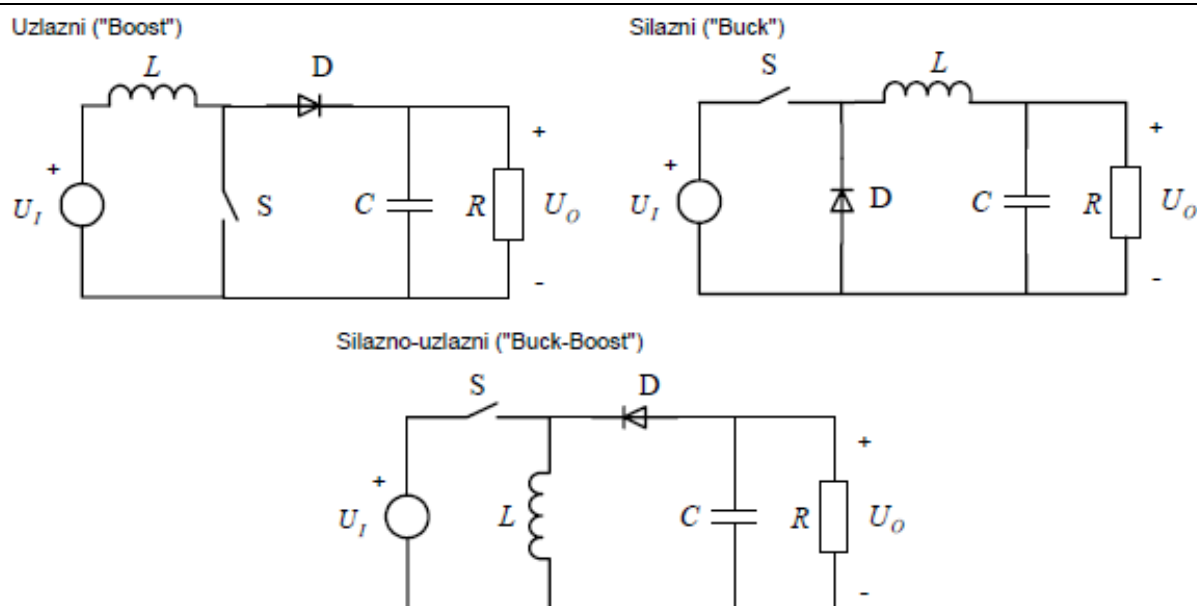
Viša razina regulacije, nadzor, osnovna obrada i bilježenje podataka se provode unutar National Instruments (NI) softverskog paketa LabView, a koji se pokreće na glavnom PC-u, opremljenom NI-MyDAQ USB karticom. Samostalna NI hardverska platforma za prikupljanje podataka i regulaciju (npr. NI Compact RIO sustav) je predviđena za složenije zadatke regulacije, obrade signala i procjenu varijabli stanja i parametara baterija i ultrakondenzatora u realnom vremenu.

4.1. DC/DC pretvarači

U ovom podpoglavlju se ukratko opisuju osnovni koncepti DC/DC pretvarača snage s posebnim naglaskom na dvo-kvadrantni uzlazno-silazni DC/DC pretvarač korišten u eksperimentalnim ispitivanjima provedenim u ovom radu.

4.1.1. Jedno-kvadratni DC/DC pretvarači

Jedno-kvadratni DC/DC pretvarači se mogu izvesti u tri temeljne izvedbe ovisno o konfiguraciji (silazna, uzlazna i silazno-uzlazna) [9], a koje ilustrira [Slika 12]. Osim po konfiguraciji, razlikujemo ih i po faktoru vođenja, d . Faktor vođenja (*engl.* duty cycle) definiran je kao omjer vremena vođenja sklopke i ukupnog vremena trajanja perioda prekapčanja, $d = T_u/T$. Osnovna pretpostavka vezana uz DC/DC pretvarače je da je period prekapčanja sklopke manji od vremenske konstante izlaznog otporničko-kondenzatorskog kruga. Pri tome se vrijednost frekvencije pretvarača u tipično u području iznad 1 kHz. S porastom vrijednosti faktora vođenja raste i iznos izlaznog napona pretvarača. Za slučaj da se koristi silazni pretvarač, napon izlaza će uvijek biti manji od napona ulaznog kruga, kod uzlaznog pretvarača napon izlaza će uvijek biti veći, a kod silazno-uzlaznog pretvarača napon izlaza može biti i veći i manji od napona ulaznog kruga, ali suprotnog polariteta.



Slika 12. Osnovne konfiguracije jedno-kvadratnih DC/DC pretvarača, [9]

[Slika 12] prikazuje shematski prikaz silazno-uzlaznog pretvarača. Ovisno o karakteru struje kroz zavojnicu može raditi u dva načina rada (*engl.* „mode“): kontinuiranom i diskontinuiranom. Kod kontinuiranog načina rada struja kroz zavojnicu nikada ne pada na nulu, dok kod diskontinuiranog načina rada struja zavojnice pada na nulu unutar intervala u kojem sklopka ne vodi i ostaje na nuli sve dok sklopka ponovno ne provede, tj. do sljedećeg ciklusa. Jedan period prekapčanja (jedan ciklus) pretvarača (T) se sastoji od jednog intervala kada je sklopka uključena (T_u) i jednog intervala kada je sklopka isključena (T_i). Kod diskontinuiranog načina rada interval kada je sklopka isključena sadrži vrijeme δT , koje odgovara trenutku u kojem struja zavojnice pada na nulu (prije završetka perioda i uključanja sklopke). Izlazni napon (U_O) kod kontinuiranog načina rada se može definirati kao:

$$U_O = -\frac{d}{1-d} U_{DC} \quad (18)$$

gdje je U_{DC} ulazni napon. Izlazni napon kod diskontinuiranog načina rada se zapisuje kao:

$$U_O = -d U_{DC} \sqrt{\frac{RT}{2L}} = \frac{d U_{DC}}{\sqrt{K}} \quad (19)$$

Razlika u odnosu na kontinuirani način rada pretvarača je u tome što izlazni napon ne ovisi samo o ulaznom naponu i faktoru vođenja, već i o induktivitetu zavojnice, izlaznom otporu te frekvenciji prekapčanja. Vrijednost parametra K (određena induktivitetom zavojnice, otporom

trošila i periodom preklapanja sklopke), odnosno odgovarajuća kritična vrijednost faktora vođenja d_c , određuju granicu između kontinuiranog i diskontinuiranog načina rada pretvarača. Odnos parametra K i kritične vrijednosti d_c dana je slijedećim izrazima:

$$K = \frac{2L}{RT} = (1 - d_c)^2 \quad \Rightarrow \quad d_c = 1 - \sqrt{K} \quad (20)$$

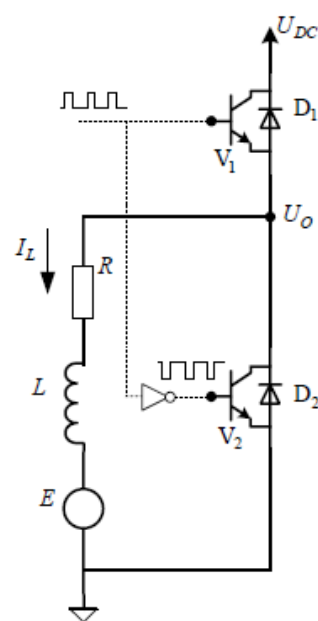
Naime, za vrijednosti faktora vođenja manje od kritične ($d < d_c$) pretvarač radi u kontinuiranom modu (struja kroz zavojnicu nikada ne pada na nulu), dok za vrijednosti faktora vođenja veće od kritične ($d > d_c$) pretvarač radi u diskontinuiranom modu.

4.1.2. Dvo-kvadratni silazno-uzlazni DC/DC pretvarač

Dvo-kvadratnim DC/DC pretvaračem se upravlja pomoću IGBT energetskih sklopki. Ovakva konfiguracija pretvarača često se koristi u praksi za upravljanje brzinom vrtnje istosmjernih motora, pri čemu se u izlazni krug pretvarača spaja armaturni namot motora.

Upravljanje se izvodi na način da kada je jedna sklopka uključena, druga je trajno isključena. Zbog lakšeg upravljanja izvode se pretvarači s istovremenim/komplementarnim upravljanjem s oba tranzistora kako pokazuje [Slika 13] Pretvaračem se upravlja isključivo postavljanjem odgovarajućeg faktora vođenja d tranzistora V_1 , dok je faktor vođenja tranzistora V_2 u tom slučaju $1-d$. Promjena moda rada pretvarača, odnosno prijelaz iz prvog u drugi kvadrant i obratno, postiže se isključivo promjenom faktora vođenja. Osim toga, u ovoj konfiguraciji pretvarača ne postoji diskontinuirani režim rada, već promjenom smjera struje trošila I_L (tj. prolaskom struje kroz nulu) dolazi do promjene moda rada. Izlazni napon U_O određen je isključivo faktorom vođenja d tranzistora V_1 ($U_O = dU_{DC}$), bez obzira na trenutni smjer struje (tj. mod rada pretvarača), jer je cijelo vrijeme vođenja izlaz pretvarača spojen na napon istosmjernog međukruga U_{DC} . Naime, ukoliko je struja $I_L < 0$ vodi povratna dioda D_1 , a ako je struja $I_L > 0$ vodi tranzistor V_1 .

S obzirom na iznose minimalne ($I_{L,min}$), maksimalne



Slika 13. Shema silazno-uzlaznog pretvarača s istovremenim upravljanjem obima tranzistorima, [9]

$(I_{L,max})$ i srednje (\bar{I}_L) vrijednosti struje trošila moguće je razlikovati četiri slučaja u radu pretvarača s odgovarajućim stanjima vođenja pojedinih komponenata:

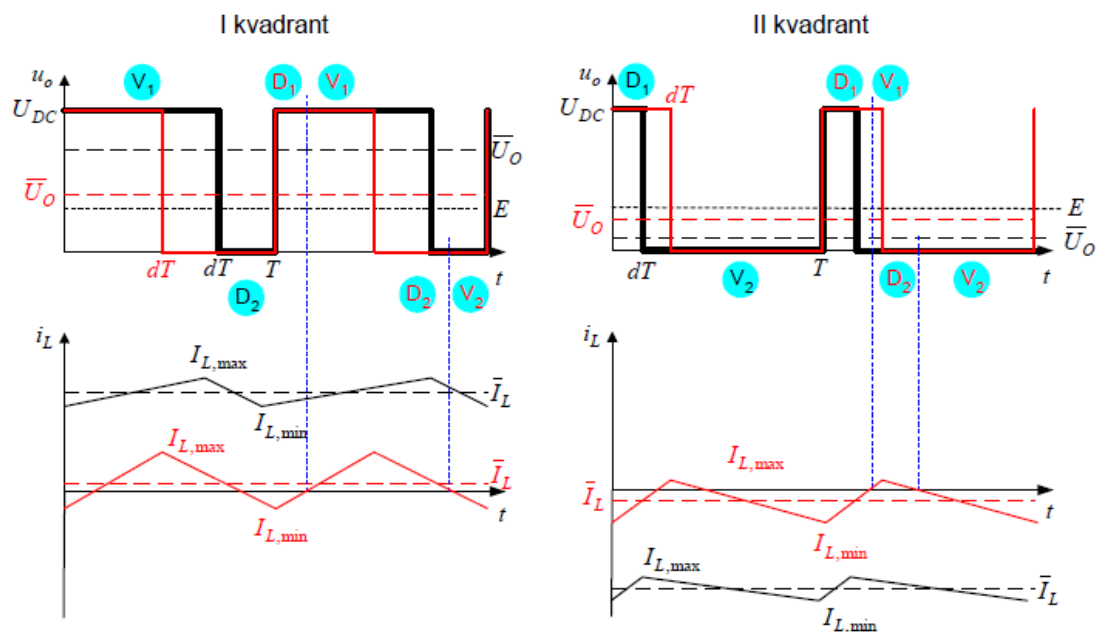
$$\bar{I}_L > 0, I_{L,min} > 0, I_{L,max} > 0 \text{ (prvi kvadrant)}$$

$$\bar{I}_L > 0, I_{L,min} < 0, I_{L,max} > 0 \text{ (prvi kvadrant)}$$

$$\bar{I}_L < 0, I_{L,min} < 0, I_{L,max} > 0 \text{ (drugi kvadrant)}$$

$$\bar{I}_L < 0, I_{L,min} < 0, I_{L,max} < 0 \text{ (drugi kvadrant)}$$

U slučaju 1, pri visokim vrijednostima faktora vođenja, struja I_L je uvijek veća od nule, pretvarač radi u prvom kvadrantu (valni oblici označeni crnom bojom na [Slika 14]), te povratna dioda D_1 i tranzistor V_2 niti u jednom trenutku ne vode. Kako se smanjuje faktor vođenja smanjuju se i vrijednosti maksimalne, srednje i minimalne struje. Za slučaj 2, srednja vrijednost struje trošila je još uvijek veća od nule, iako je minimalna struja manja od nule (suprotnog predznaka). Pretvarač radi u prvom kvadrantu (valni oblici označeni crvenom bojom na [Slika 14]). Pritom, za trajanja visokog stanja upravljačkog PWM signala (vremenski interval dT), vodi dioda D_1 odnosno tranzistor V_1 . Povratna dioda vodi u početku promatranog intervala, dok je struja I_L manja od nule. Kada struja dosegne pozitivne vrijednosti tranzistor V_1 počinje voditi dok je u tom slučaju dioda D_1 reverzno polarizirana. Spuštanjem upravljačkog PWM signala u logičku nulu, vode na sličan način tranzistor V_2 (za struje manje od nule) i dioda D_2 (za struje veće od nule). Identično stanje vođenja komponenata pretvarača dobiva se i u slučaju 3 dobivenog daljnjim smanjenjem faktora vođenja, s tom razlikom da je srednja vrijednost struje negativna, odnosno da pretvarač radi u drugom kvadrantu (valni oblici označeni crvenom bojom na [Slika 14]). Za slučaj 4, karakterističan za niske vrijednosti faktora vođenja, struja I_L je uvijek manja od nule, pretvarač radi u drugom kvadrantu (valni oblici označeni crnom bojom na [Slika 14]), te povratna dioda D_2 i tranzistor V_1 niti u jednom trenutku ne vode.



Slika 14. Valni oblici napona i izlazne struje te stanja vođenja komponenata dvo-kvadrantnog pretvarača sa Slike 12., [9]

5. PROJEKTIRANJE REGULACIJSKOG SUSTAVA TESTNOG POSTAVA

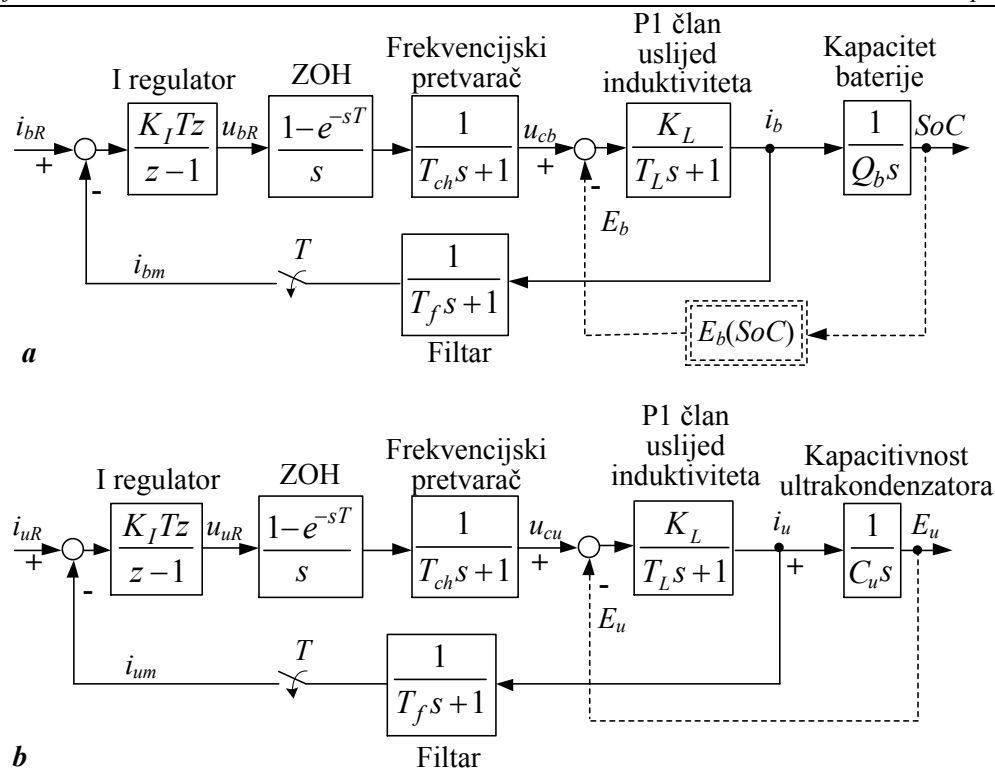
Projektiranje regulacijskog sustava testnog postava podrazumijeva regulaciju struje punjenja/pražnjenja baterije/ultrakondenzatora i regulaciju napona DC međukruga.

5.1. Projektiranje regulatora struje i regulatora napona DC međukruga

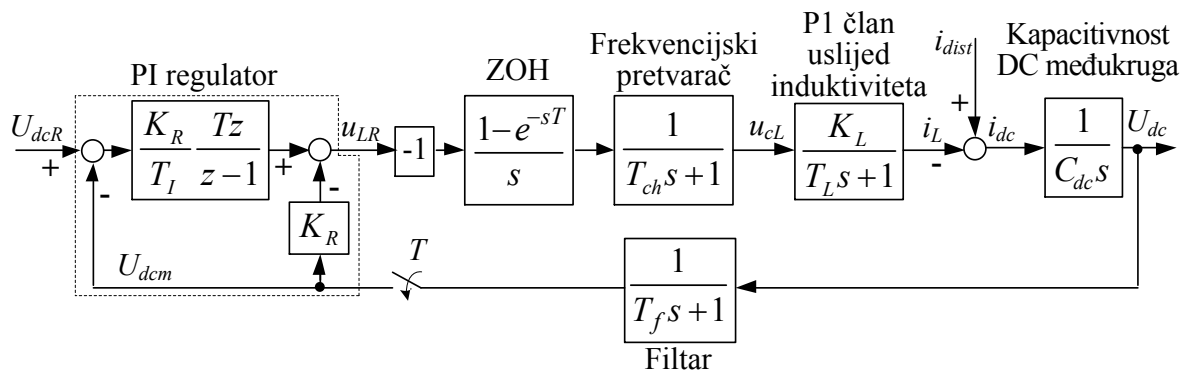
Regulacija struje riješena je pomoću jednostavnog vremenski-diskretnog (digitalnog) regulatora s integrirajućim djelovanjem (I regulator) s ciljem postizanja statičke točnosti regulacije i zadovoljavajućeg podešenja dinamike zatvorenog regulacijskog kruga kako je pokazano u nastavku. Prilikom projektiranja u obzir su uzeti efekti pojedinih elemenata regulacijskog sustava karakterizirani relativno brzom dinamikom poput frekvencijskog pretvarača, prigušnice i mjernog filtra, te ekvivalentnog kašnjenja uslijed uzorkovanja signala i učinka kašnjenja postavljanja upravljačkog signala modeliranog pomoću ekstrapolatora nultog reda (*engl.* „Zero Order Hold“, ZOH). Također, treba imati na umu i stanje napunjenosti baterije i ultrakondenzatora, te s time povezani iznos elektromotorne sile E_b i E_u koji su tipično sporo promjenjivi zbog velikih iznosa nabojskog kapaciteta baterije Q_b , odnosno kapacitivnosti (kapaciteta) ultrakondenzatora C_u , koji se stoga sa stanovišta projektiranja sustava regulacije struje mogu tretirati kao spori poremećaji. Slika blokovskog dijagrama regulacije struje baterije i ultrakondenzatora prikazana je na [Slika 15].

Regulacija napona DC međukruga riješena je proporcionalno-integrirajućim (PI) regulatorom, kako prikazuje [Slika 16], a koji je potrebno uključiti samo tijekom pražnjenja baterije/ultrakondenzatora. Naime, tijekom pražnjenja baterije/ultrakondenzatora napon DC međukruga (odnosno napon na odgovarajućem kapacitetu C_{dc}) raste, te je stoga potrebno osigurati približno stalan statički napon i spriječiti da DC međukrug uđe u zasićenje napona (u prisustvu takve „poremećajne“ struje pražnjenja baterije/ultrakondenzatora i_{dist}). Negativni iznos struje opterećenih otpora (predznak se korigira u PI regulatoru) objašnjava se činjenicom da se kapacitet kondenzatora DC međukruga prazni preko opterećenih otpora R_L .

Efektivno kašnjenje frekvencijskog pretvarača uslijed PWM djelovanja sa frekvencijom f_{ch} , može biti približno opisano P1 dinamičkim članom s vremenskom konstantom prvog reda $T_{ch} = 1/f_{ch}$, dok je izlazni napon DC komponente proporcionalan PWM periodu prekapčanja d i naponu istosmjernog priključka U_{dc} , tj. $u_c = dU_{dc}$.



Slika 15. Blokovski dijagrami regulacijskog kruga struje baterije (a) i ultrakondenzatora (b)



Slika 16. Blokovski dijagram regulacijskog kruga napona DC međukruga

P1 dinamički član koji opisuje učinak induktiviteta prigušnice i serijskih radnih otpora karakteriziran je pojačanjem K_L i vremenskom konstantom T_L , koji se definiraju kao:

$$K_L = \frac{1}{R_{tot}}, T_L = \frac{L_c}{R_{tot}} \quad (21)$$

gdje je R_{tot} cjelokupni serijski otpor. R_{tot} uključuje zavojnicu sa otporom IGBT sklopki R_s i serijski otpor baterije (ultrakondenzatora) R_b (R_u) u slučaju regulacijskog kruga struje ili otpore skupa opterećenih otpora R_L za slučaj regulacijskog kruga napona DC međukruga.

Utjecaji uzorkovanja i ekstrapolatora nultog reda (ZOH) mogu se aproksimirati za svrhu projektiranja regulatora u vremenski kontinuiranom području aperiodskim članom prvog reda sa ekvivalentnom (parazitskom) vremenskom konstantom jednako polovici iznosa vremena uzorkovanja $T_{par} = T/2$ [10].

Parametri regulatora struje baterije/ultrakondenzatora i regulatora napona DC međukruga su određeni preko kriterija optimuma dvostrukog odnosa (vidi na primjer [11] i tamo navedene reference). To je analitička metoda za određivanje parametara regulatora linearnog vremenski-kontinuiranog sustava punog ili reduciranog reda. Metoda se temelji na karakterističnom polinomu zatvorenog kruga danom u obliku:

$$A_C(s) = D_2^{n-1} D_3^{n-2} \dots D_n T_e^n s^n + \dots + D_2 T_e^2 s^2 + T_e s + 1 \quad (22)$$

gdje je T_e ekvivalentna vremenska konstanta zatvorenog kruga, a D_2, D_3, \dots, D_n su karakteristični odnosi optimuma dvostrukog odnosa. U optimalnom slučaju optimum se postavlja na $D_i = 0.5$ ($i = 2 \dots n$). Tako se dobiva kvazi-aperiodski odziv zatvorenog kruga (bilo kojeg reda n) karakterističnog po aperiodskom odzivu s nadvišenjem od približno 6% i trajanjem uspona od približno $1.8T_e$. Odabirom većeg iznosa T_e , generalno se povećava robusnost regulacijskog sustava i smanjuje osjetljivost na šum, ali se u slučaju sporijeg odziva smanjuje učinkovitost otklanjanja utjecaja poremećaja. Za slučaj regulatora reduciranog reda samo se dominantni članovi D_2, D_3, \dots, D_r ($r < n$) postavljaju na optimalni iznos od 0.5.

Imajući u vidu da elektromotornu silu baterije/ultrakondenzatora E_b i E_u karakteriziraju vrlo spore promjene s obzirom na određeno stanje napunjenosti, ta povratna veza se može dinamički „isključiti“ za potrebe projektiranja „brzog“ regulatora struje. Pored toga, iznosi ekvivalentnih vremenskih konstanti (kašnjenja) frekvencijskog pretvarača, utjecaja ekstrapolatora nultog reda i uzorkovanja, P1 člana uslijed induktiviteta i mjernog filtra su prilično bliskih iznosa, tako da se njihov kombinirani učinak može aproksimirati sljedećim ekvivalentnim dinamičkim članom prvog reda:

$$G_p(s) = \frac{K_L}{T_\Sigma s + 1} \quad (23)$$

gdje je ekvivalentna vremenska konstanta $T_\Sigma = T/2 + T_{ch} + T_L + T_f$.

Obzirom na prethodna pojednostavljenja, sustav regulacije struje sa pripadajućim integrirajućim regulatorom se može opisati slijedećom prijenosnom funkcijom zatvorenog kruga:

$$G_p(s) = \frac{1}{\frac{T_\Sigma}{K_I K_L} s^2 + \frac{1}{K_I K_L} s + 1} \quad (24)$$

Izjednačavanjem koeficijenata karakterističnog polinoma zatvorenog kruga iz (24) sa karakterističnim polinomom optimuma dvostrukog odnosa drugog reda (jednadžba (22) uz $n = 2$), te njihovim preslaganjem, dobiju se jednadžbe za parametre I regulatora:

$$T_{ei} = \frac{T_\Sigma}{D_{2i}} \quad (25)$$

$$K_I = \frac{1}{K_L T_{ei}} = \frac{R_{tot}}{T_{ei}} \quad (26)$$

Uzevši u obzir ranije navedeno pojednostavljenje prikazano u obliku dinamičkog člana prvog reda (23), prijenosna funkcija zatvorenog kruga regulacije napona DC međukruga se može zapisati kao:

$$G_{cu}(s) = \frac{1}{\frac{C_{dc} T_\Sigma T_I}{K_R K_L} s^3 + \frac{C_{dc} T_I}{K_R K_L} s^2 + T_I s + 1} \quad (27)$$

Izjednačavanjem koeficijenata karakterističnog polinoma zatvorenog kruga iz (27) sa karakterističnim polinomom optimuma dvostrukog odnosa trećeg stupnja, dobiju se izrazi za parametre PI regulatora napona DC međukruga:

$$T_I = T_{eu} = \frac{T_\Sigma}{D_{2u} D_{3u}} \quad (28)$$

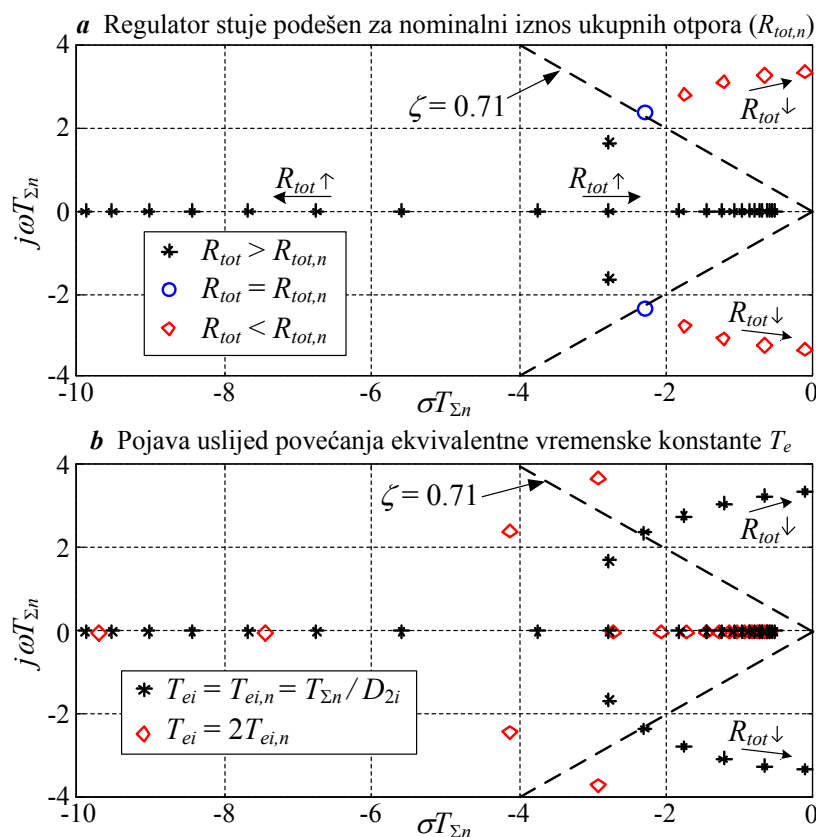
$$K_R = \frac{C_{dc}}{D_{2u} K_L T_{eu}} = \frac{R_{tot} C_{dc}}{D_{2u} T_{eu}} \quad (29)$$

5.2. Analiza robusnosti regulacijskog kruga struje

Uzimajući u obzir jednadžbe (25) i (26), podešenje regulatora struje može biti osjetljivo na različite iznose ukupnog serijskog otpora R_{tot} , zbog njegovog utjecaja na ekvivalentnu vremensku konstantu T_Σ (posebice na vremensku konstantu T_L) i pojačanje K_L u modelu

procesa (23). Promjena otpora može u određenoj mjeri utjecati na regulaciju struje olovne baterije, jer se njezin unutrašnji otpor (R_b) može znatno mijenjati sa promjenom stanja napunjenosti baterije (SoC). Zbog toga će se analizirati prigušenje prijenosne funkcije (24) regulacijskog kruga struje za širok raspon otpora R_{tot} u odnosu na nazivni iznos $R_{tot,n}$.

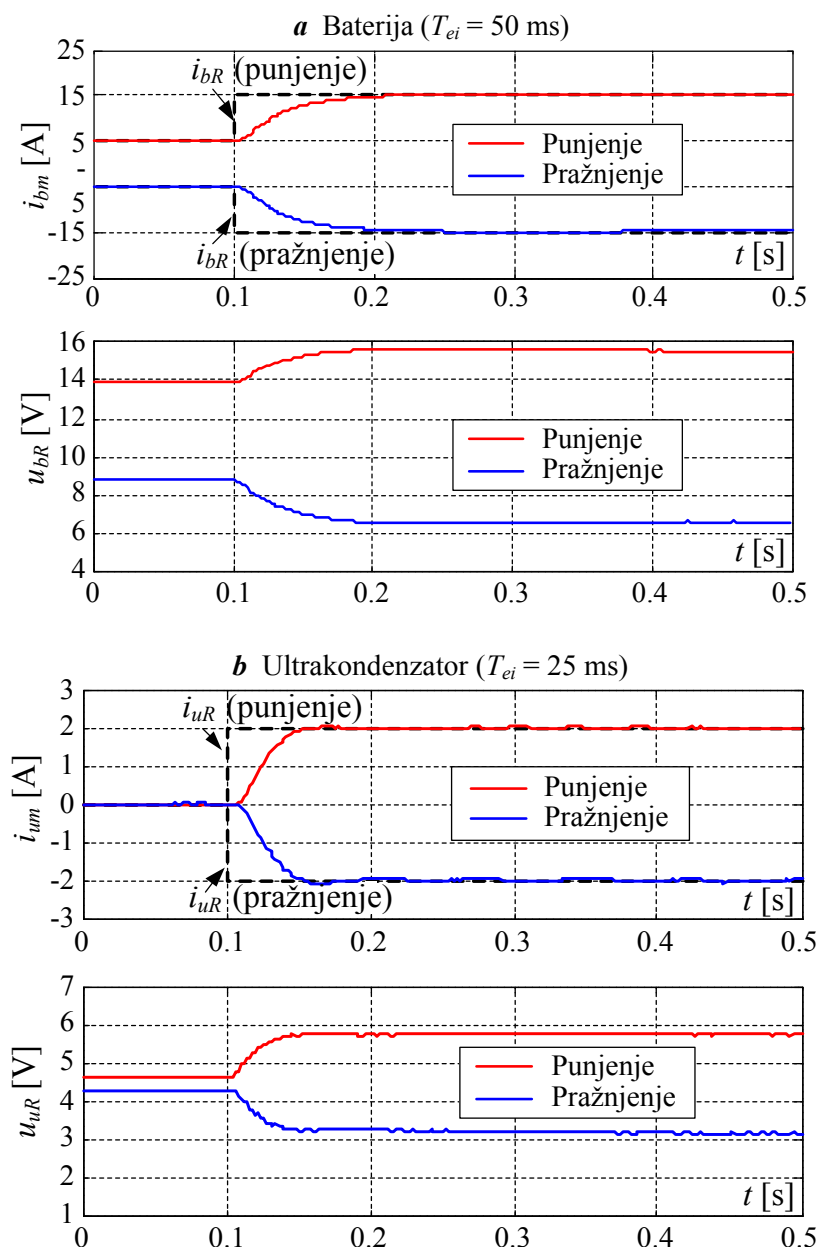
[Slika 17] prikazuje usporedne grafove lokusa korijena regulacijskog kruga struje, normirane s obzirom na nazivni iznos vremenske konstante T_Σ ($T_\Sigma = T_{\Sigma n}$). Za slučaj nazivnog podešenja I regulatora, porast ukupnog otpora R_{tot} s obzirom na nazivni iznos $R_{tot,n}$ rezultira povećanjem prigušenja zatvorenog regulacijskog kruga (uz, naravno, sporiji odziv), jer polovi zatvorenog kruga zauzimaju isključivo realne vrijednosti i primiču se ishodištu koordinatnog sustava. Za slučaj da ukupni otpor opada u odnosu na nazivni iznos, konjugirano kompleksni polovi se pomiču u područje slabih prigušenja (odnosno na granično-stabilne, te čak nestabilne lokacije). Utjecaj porasta ekvivalentne vremenske konstante zatvorenog kruga T_{ei} prikazana je na [Slika 17.,b]. Porastom vremenske konstante zatvorenog kruga s obzirom na nazivni iznos $T_{ei,n}$ robusnost sustava se generalno povećava, zato jer se polovi zatvorenog kruga pomiču prema području povoljnijih prigušenja.



Slika 17. Grafovi lokusa korijena regulacijskog kruga struje za nazivno podešenje regulatora (a) i podešenje za T_{ei} veće od nazivnog iznosa (b)

5.3. Eksperimentalna provjera regulacijskih sustava

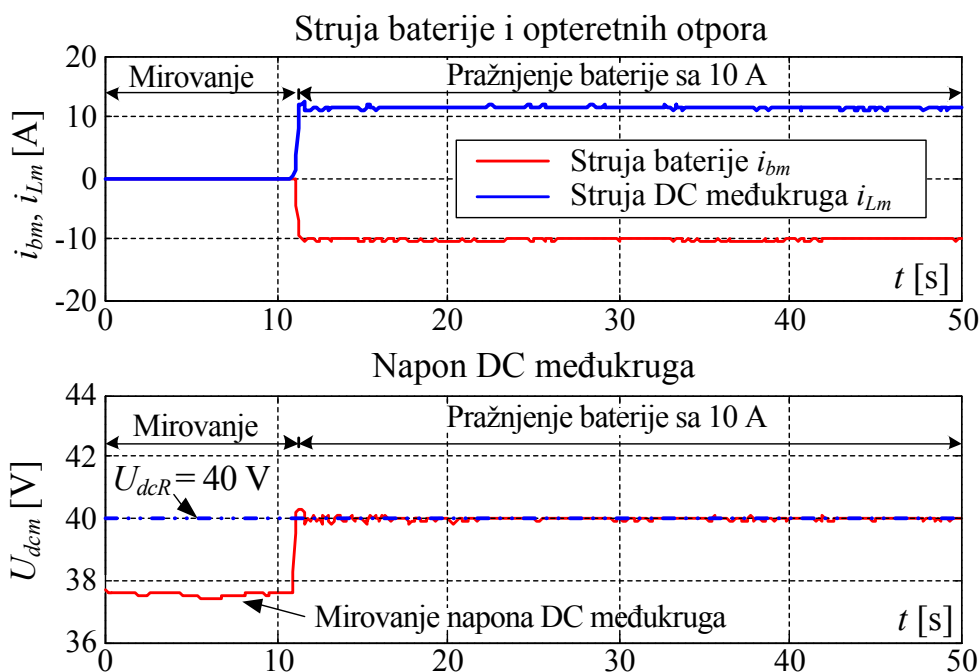
Predloženi regulacijski sustav struje baterije/ultrakondenzatora i napona DC međukruga je implementiran i eksperimentalno validiran na laboratorijskom postavu za slučajeve punjenja i pražnjenja za širok raspon iznosa struja.



Slika 18. Usporedba odziva na step pobudu punjenja/pražnjenja regulacijskog kruga struje za bateriju (a) i ultrakondenzator (b)

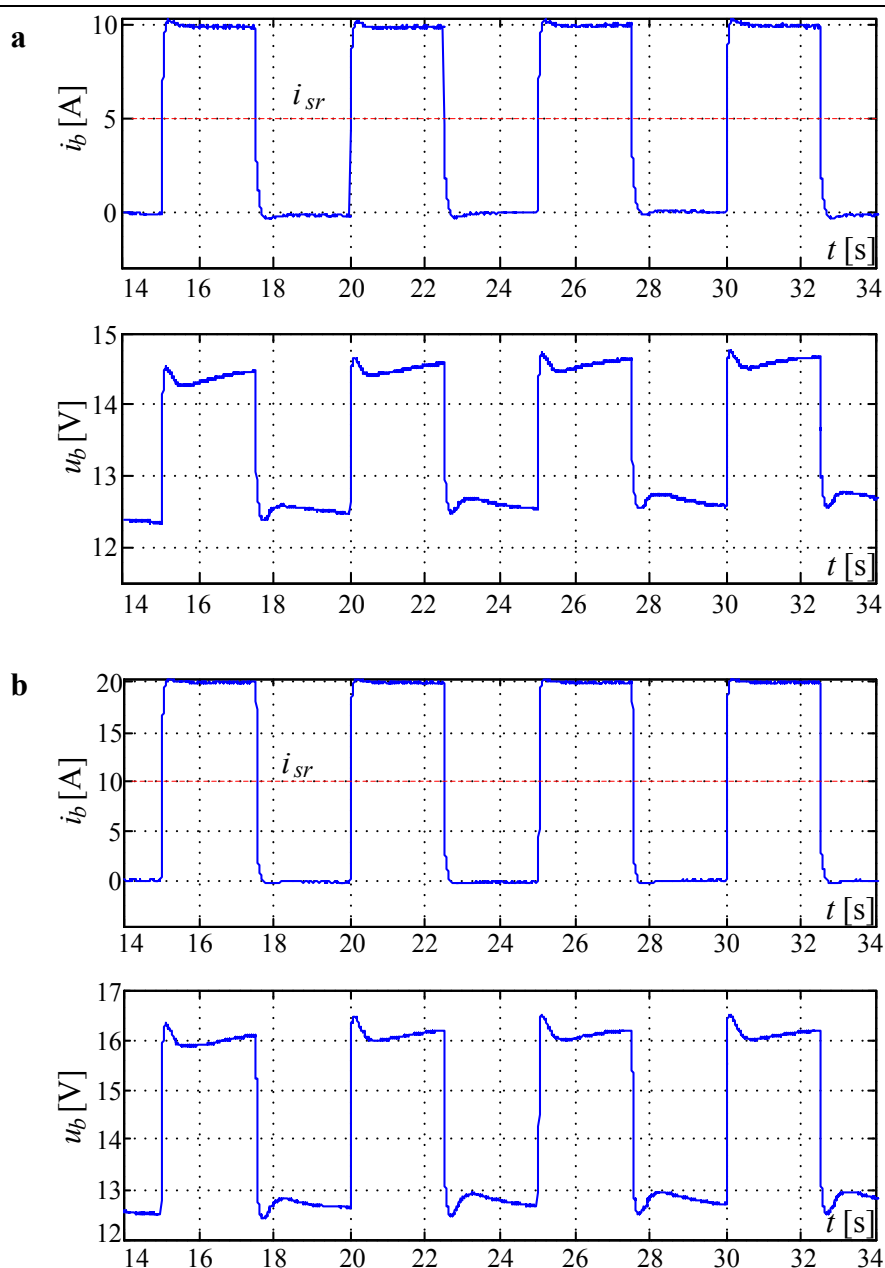
[Slika 18] usporedno prikazuje odzive na step pobudu reference struje regulacijskog kruga baterije i ultrakondenzatora za slučajeve punjenja i pražnjenja. Rezultati prikazuju da predloženi regulatori struje, projektirani prema optimumu dvostrukog odnosa, osiguravaju

povoljno prigušenje zatvorene petlje sustava. Brzina odziva je određena odabirom ekvivalentne vremenske konstante sustava T_{ei} . U slučaju regulatora struje olovne baterije, uzeta je vremenska konstanta relativno velikog iznosa ($T_{ei} = 50$ ms) kako bi osigurali robusno vladanje sustava zbog neodređenosti prilikom modeliranja (tj. promjenjivog unutarnjeg otpora baterije R_b), što rezultira vremenom smirivanja od približno 100 ms. S druge strane, u slučaju ultrakondenzatora uzeta je ekvivalentna vremenska konstanta u iznosu od $T_{ei} = 25$ ms, što rezultira dvostruko bržim odzivom sustava.



Slika 19. Usporedba odziva sustava regulacije struje baterije i napona DC međukruga tijekom pražnjenja baterije

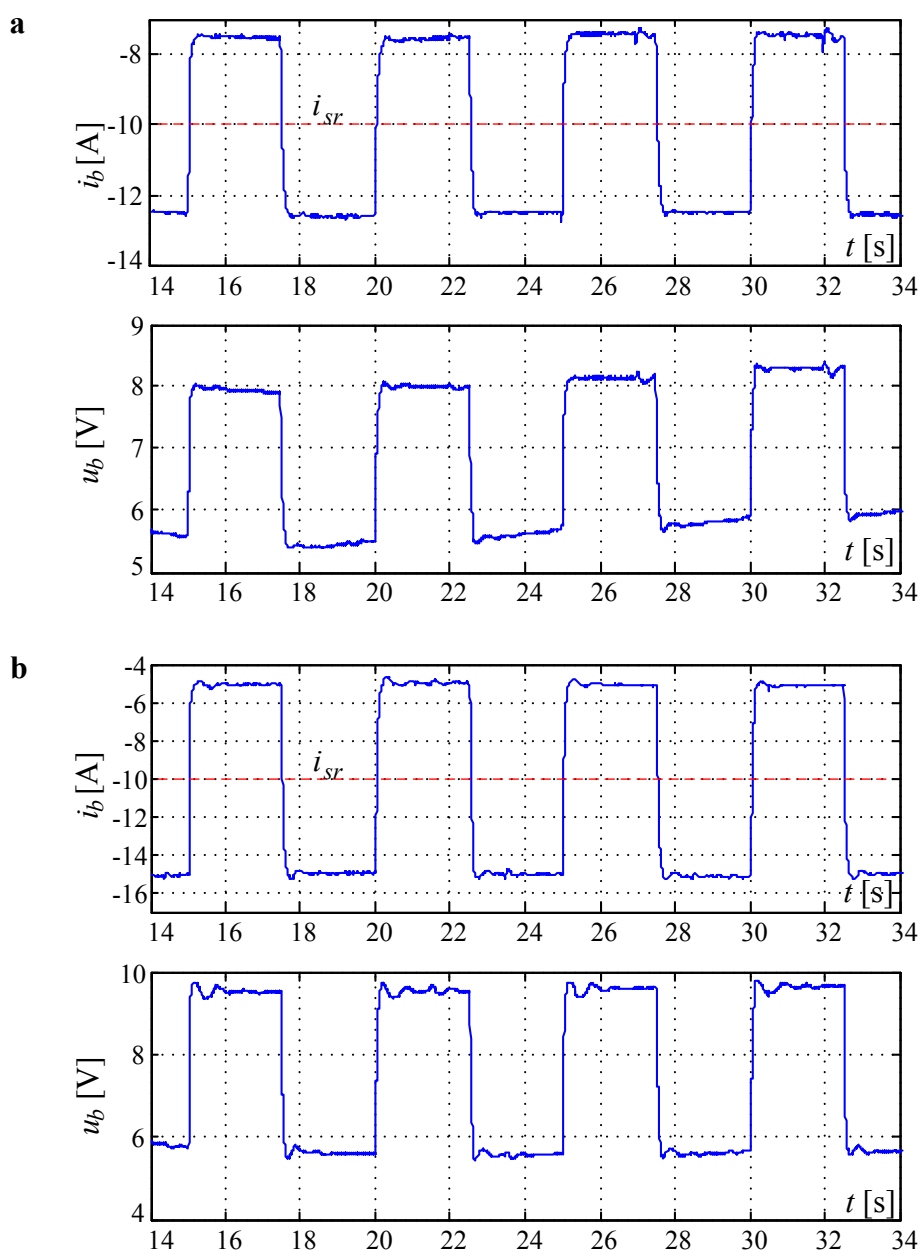
[Slika 19] prikazuje usporedne odzive sustava regulacije struje i sustava regulacije napona DC međukruga za slučaj pražnjenja olovne baterije konstantnom strujom. Na slici je vidljivo da se napon DC međukruga na početku pražnjenja naglo povećao sa iznosa napona u mirovanju (kapacitivnost DC međukruga se puni preko baterije). Regulator napona DC međukruga (koji je isključen za negativne iznose reference struje), brzo nadoknađuje ovo povećanje napona pražnjenjem kondenzatora DC međukruga preko opteretnih otpora i stacionira (ustaljuje) napon na unaprijed određenu vrijednost za slučaj pražnjenja baterije ($U_{dcR} = 40$ V). Imajući to na umu regulator napona DC međukruga treba nadoknaditi i struju pražnjenja baterije i doprinos ispravljača (predstavljen „poremećajnom“ strujom i_{dist} na [Slika 16]), što rezultira nešto većim statičkim vrijednostima struje opteretnih otpora u odnosu na statičke vrijednosti struje pražnjenja baterije.



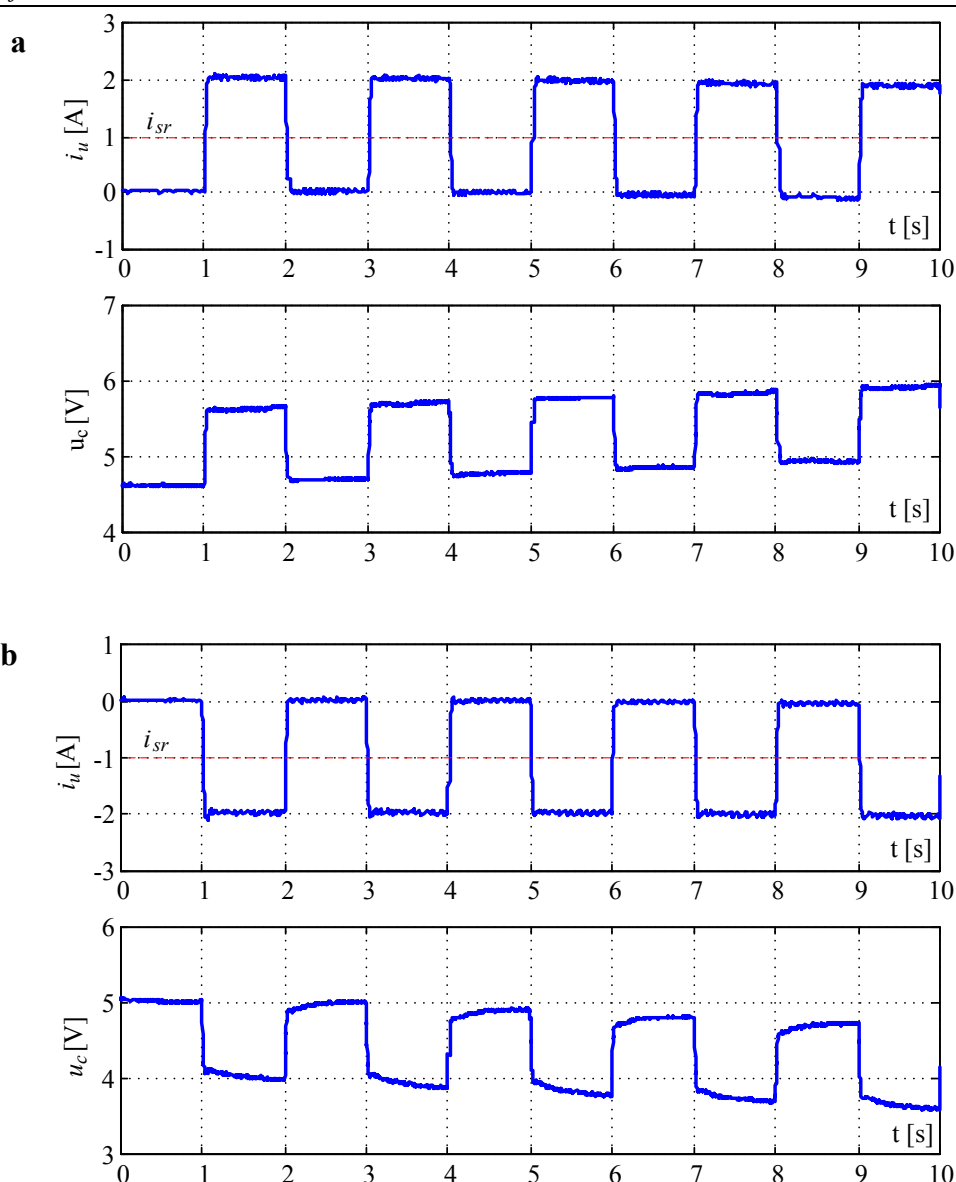
Slika 20. Odzivi regulacijskog kruga struje baterije na punjenje srednjom strujom 5 A uz skokovite promjene ± 5 A (a) i srednjom strujom 10 A uz skokovite promjene ± 10 A (b)

[Slika 20] i [Slika 21] pokazuju odzive regulacijskog kruga struje baterije prilikom punjenja i pražnjenja pulsnim (pravokutnim) profilom struje frekvencije $f = 0.2$ Hz. Cilj eksperimenata je ilustrirati ponovljivost dinamičkih značajki regulacijskih krugova struje, odnosno njihovu robusnost u smislu dobrog prigušenja i jednake brzine odziva regulacijskog kruga kroz dulji vremenski period. [Slika 20,a] prikazuje vladanje sustava pri punjenju baterije strujom srednjeg iznosa 5 A na koju je superponiran pravokutni valni oblik karakteriziran skokovitim promjenama reference struje od ± 5 A, dok [Slika 20,b] prikazuje

slučaj kada je srednja vrijednost struje iznosa 10 A, a pravokutni signal reference je karakteriziran skokovitim promjenama iznosa ± 10 A. Iz odziva je vidljivo da je regulacijski sustav karakteriziran povoljnim iznosima prigušenja ($\zeta \geq 0.71$), uz vrlo sličnu brzinu odziva bez obzira na iznos struje i skok reference. Također, [Slika 21] prikazuje odzive sustava prilikom pražnjenja baterije. [Slika 21,a] prikazuje pražnjenje srednjom strujom od -10 A uz superponirane skokovite promjene od ± 2.5 A, dok [Slika 21,b] prikazuje pražnjenje srednjom strujom od -10 A uz skokovite promjene od ± 5 A. Vidljivo je da su i u slučaju pražnjenja odzivi dobro prigušeni uz približno jednake brzine odziva, te da je ostvarena dobra ponovljivost u sprezi sa regulatorom napona DC međukruga.



Slika 21. Odzivi regulacijskog kruga struje baterije na pražnjenje srednjom strujom -10 A uz skokovite promjene ± 2.5 A (a) i srednjom strujom -10 A uz skokovite promjene ± 5 A (b)



Slika 22. Odzivi regulacijskog kruga struje ultrakondenzatora na punjenje srednjom strujom 1 A uz skokovite promjene ± 1 A (a) i pražnjenje srednjom strujom -1 A uz skokovite promjene ± 1 A (b)

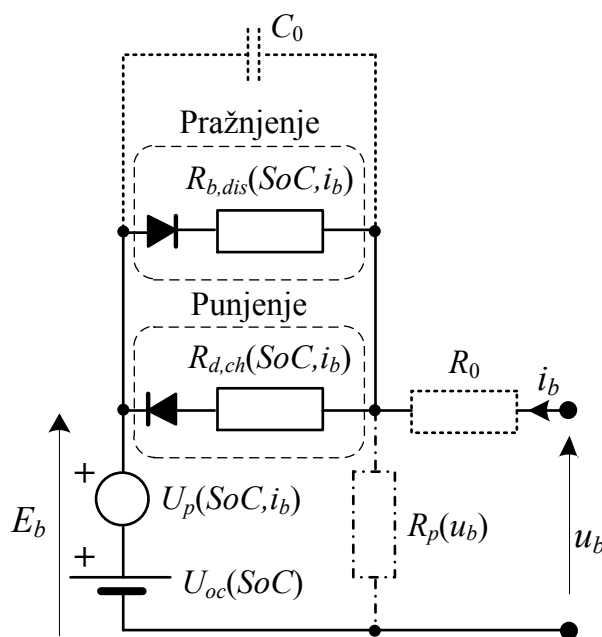
Također, napravljen je test punjenja i pražnjenja pulsnim (pravokutnim) profilom struje na ultrakondenzatorskom modulu. Rezultate testa prikazuje [Slika 22]. Rezultati testova pokazuju da sustav i u ovom slučaju ima dobru ponovljivost rezultata, te je vidljivo da su odzivi dobro prigušeni uz približno jednake brzine odziva uz ponovljivost dinamičkog vladanja regulacijskog kruga struje u sprezi sa regulatorom napona DC međukruga.

6. EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE PARAMETARA NADOMJESNIH MODELA OLOVNE BATERIJE I ULTRAKONDENZATORA

6.1. Identifikacija matematičkog modela olovne baterije

6.1.1. Nadomjesni strujni krug olovne baterije

Osnovni modeli nadomjesnih električnih krugova za elektrokemijske baterije prikazani su u podpoglavlju 3.1., a matematički modeli temeljeni na njima u podpoglavlju 3.2. Kako je već navedeno, model korišten kao baza za izradu matematičkog modela baterije je „kvazi-stacionarni“ model baterije kako prikazuje [Slika 5.,b]. [Slika 23] prikazuje prošireni model baterije, koji kao i osnovni model sadrži protuparalelno spojene idealne diode koje određuju da li se radi o punjenju ili pražnjenju baterije, a kojima su u seriju spojeni pripadajući serijsko spojeni otpori.



Slika 23. Nadomjesni strujni krug baterije

Za vrijeme mirovanja baterije, kada se ona niti puni niti prazni, na stezaljkama je moguće izmjeriti napon otvorenog kruga U_{OC} . Prilikom punjenja/pražnjenja, na stezaljkama baterije nije prisutan samo napon otvorenog kruga U_{OC} već se javlja i napon polarizacije U_p uslijed polarizacije elektrolita, te pad napona na unutarnjim otporima. Zbroj U_{OC} i U_p čini

elektromotornu silu (EMS) E_b . Zbog toga je u „kvazi-stacionarni“ model baterije potrebno uvesti dva serijski spojena izvora napona od kojih prvi, stalni izvor, predstavlja napon otvorenog kruga, a drugi izvor, koji daje napon samo za vrijeme punjenja/pražnjenja, predstavlja napon polarizacije. U model se također mogu uvrstiti i određeni sekundarni efekti koji se javljaju u bateriji, poput dinamičkog napona na stezaljkama (npr. nakon iznenadne promjene struje baterije) modeliranog nadomjesnim kapacitetom C_0 . Moguće je uključiti i dodatni otpor R_0 koji predstavlja efekte otpora na stezaljkama, ali i paralelni nelinearni otpor R_p koji predstavlja efekte samopražnjenja baterije.

Napon otvorenog kruga nije konstantna veličina, nego je ovisan o stanju napunjenosti (SoC) baterije, dok napon polarizacije koji uz SoC ovisi i o struji punjenja/pražnjenja [12]. Kako svi glavni parametri modela baterije ovise o stanju napunjenosti, potrebno je definirati izraz za stanje napunjenosti baterije u ovisnosti o mjerljivim veličinama baterije. Kako izraz (1) definira SoC u ovisnosti o trenutnoj količini naboja u bateriji (koja kod olovnih baterija ovisi o koncentraciji elektrolita) sljedeći izraz se pokazao prikladnim za primjenu u praksi [12]:

$$SoC = 1 - \frac{\Delta Q_b}{Q_{max}(I_b)} \quad (30)$$

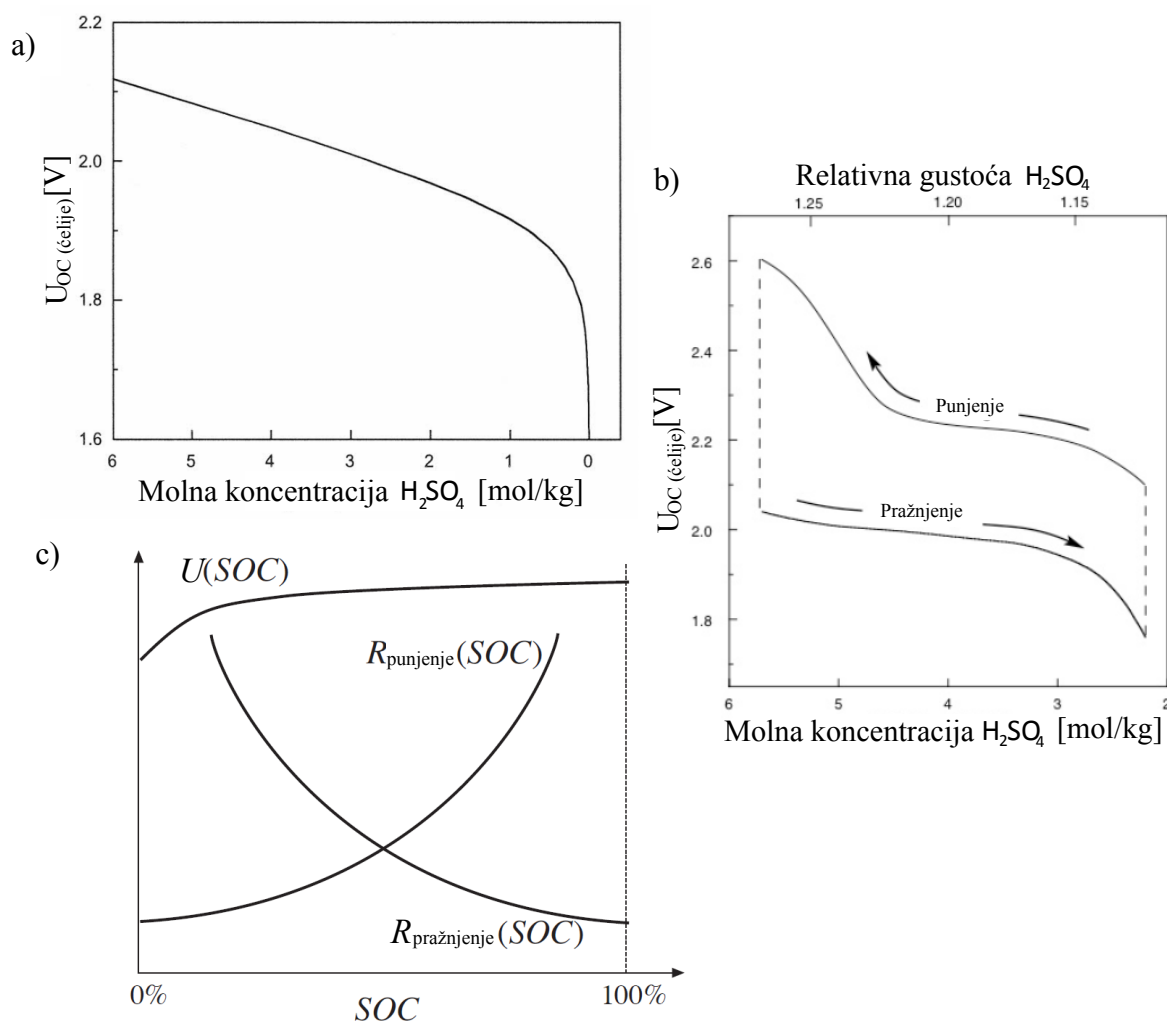
gdje je ΔQ_b količina ispražnjenog naboja (a koji se može gledati relativno u odnosu na početnu radnu točku baterije), dok je $Q_{max}(I_b)$ maksimalni naboj koji je moguće isprazniti iz baterije pri određenoj struji I_b . ΔQ_b se prema [12] definira kao $\int -i_b dt$.

U specijalnim slučajevima kada je poznat idealni nabojski kapacitet $Q_{max}(0)$ kada je baterija u mirovanju moguće je govoriti o „idealnom“ stanju napunjenosti baterije SoC_0 koji se prema [12] definira kao:

$$SoC_0 = 1 - \frac{\Delta Q_b}{Q_{max}(0)} \quad (31)$$

„Idealno“ stanje napunjenosti baterije SoC_0 u slučaju olovne baterije je direktno vezano uz koncentraciju elektrolita (sumporne kiseline) kako prikazuje [Slika 24,a]. Štoviše, zbog povezane ovisnosti napona otvorenog kruga, napona polarizacije i unutarnjeg otpora, ukupni napon na stezaljkama može se mijenjati po histerezi tijekom jednog ciklusa punjenja i pražnjenja, kao na [Slika 24,b]. Obzirom na navedeno, ako bi se baterija sa niskom koncentracijom sumporne kiseline duboko praznila došlo bi do ubrzanog starenja baterije,

odnosno trajnog smanjenja efektivnog nabojskog kapaciteta baterije i smanjenja vijeka trajanja [13].



Slika 24. Analitički rezultati za napon otvorenog kruga ćelije olovne baterije (a), napon na stezaljkama ćelije za vrijeme punjenja/ pražnjenja (b) i unutarnji otpor u ovisnosti o stanju napunjenosti baterije prema [14,15]

Maksimalni kapacitet naboja baterije u ovisnosti o struji pražnjenja baterije $Q_{max}(I_d)$, potreban za izračunavanje SoC može se opisati dobro poznatom Peukertovom jednadžbom [12,15], koja ovisi o struji pražnjenja I_d , trajanju pražnjenja ΔT i Peukertovom koeficijentu k (tipično između 1.1 i 1.3, [15]):

$$I_d^k \Delta T = konst. \quad (32)$$

Peukertova jednadžba pokazuje da naboj baterije za male iznose struje pražnjenja doseže jako velike iznose (što može odstupati od realnih vrijednosti), te je stoga u [12] predložen

znatno prikladniji odnos ovisnosti dostupnog akumuliranog naboja baterije i struje pražnjenja, a koji uključuje i temperaturnu ovisnost:

$$Q_{max}(I_d, \theta) = \frac{K_c Q_{max}(I_{d0}) \left(1 - \frac{\theta}{\theta_f}\right)^\varepsilon}{1 + (K_c - 1) \left(\frac{I_d}{I_{d0}}\right)^\delta} \quad (33)$$

gdje je θ trenutna temperatura elektrolita, θ_f temperatura smrzavanja elektrolita, I_d struja pražnjenja baterije, K_c parametar aproksimirane krivulje, δ i ε empirijski parametri (dobiveni testom pražnjenja baterije), a I_{d0} je takozvana „referentna“ struja čiji iznos se bira tako da bude bliska nazivnoj (trajnoj) struji kod koje se ostvaruje nominalni kapacitet pražnjenja baterije. U slučaju relativno malih temperaturnih promjena baterije, jednadžba (33) se može jednostavnije zapisati kao:

$$Q_{max}(I_d) = \frac{K_c Q_{max}(I_{d0}) \alpha_\theta}{1 + (K_c - 1) \left(\frac{I_d}{I_{d0}}\right)^\delta} \quad (34)$$

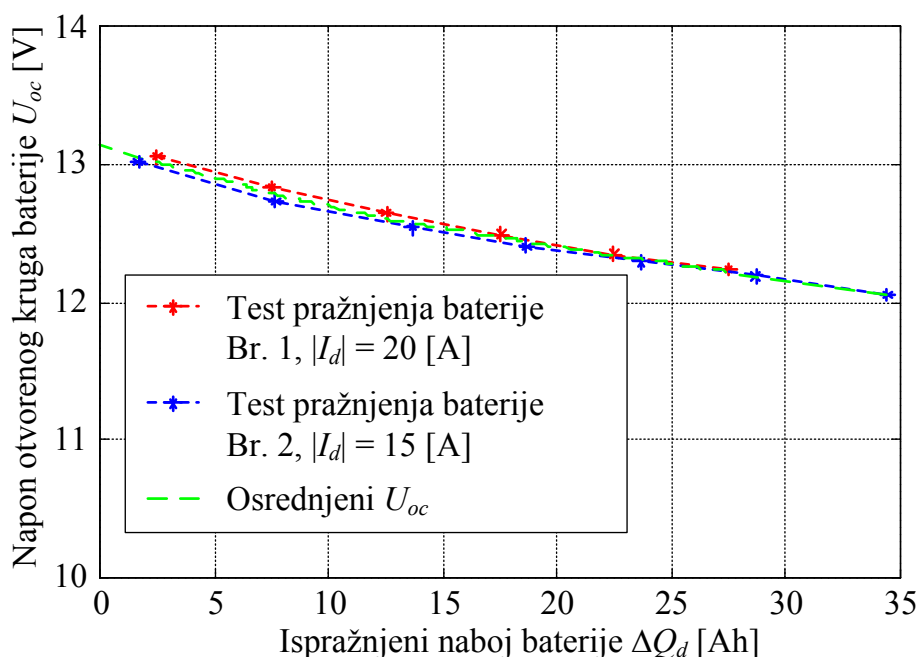
gdje je temperaturno ovisni član $\left(1 - \frac{\theta}{\theta_f}\right)^\varepsilon$ iz jednadžbe (33) zamijenjen konstantnim parametrom α_θ .

6.1.2. Određivanje napona otvorenog kruga i estimacija kapaciteta pražnjenja

Krivulja napona otvorenog kruga i krivulja kapaciteta baterije snimljene su pomoću testa pražnjenja konstantnom strujom, ilustriranog na [Slika 19]. Eksperiment pražnjenja za potrebe rekonstrukcije krivulje napona otvorenog kruga baterije se sastoji od bilježenja napona prije početka svakog koraka pražnjenja, pražnjenja naboja baterije u relativno malim koracima (oko 5 Ah za razmatranu bateriju), te dužeg čekanja nakon svakog koraka (minimalno 1 sat). Krivulje se dobivaju interpoliranjem dobivenih vrijednosti za svaku struju posebno. [Slika 25] prikazuje krivulje ovisnosti napona otvorenog kruga baterije o količini ispražnjenog naboja iz baterije. Početne vrijednosti krivulja sa [Slika 25], pomaknute su s obzirom na maksimalni iznos naboja ($SoC = 100\%$), koji je povezan sa maksimalnim iznosom napona praznog hoda baterije (13.11 V što daje 2.185 V po ćeliji) koji je zabilježen tijekom mjerenja.

Također, treba napomenuti kako se zbog postizanja što bliskijih početnih uvjeta mjerenja (a s ciljem smanjenja rasipanja rezultata) nakon svakog punjenja baterije čekalo oko 12 sati prije nego li bi se otpočeo novi ciklus mjerenja, uključivo s mjerenjima napona otvorenog kruga. [Slika 25] prikazuje napon praznog hoda za dvije različite struje pražnjenja. Kako

krivulje pokazuju relativno malo rasipanje, moguće je napraviti jednu osrednjenu krivulju napona otvorenog kruga baterije, označenu zelenom bojom na [Slika 25], koja će nam poslužiti u daljnjim razmatranjima.

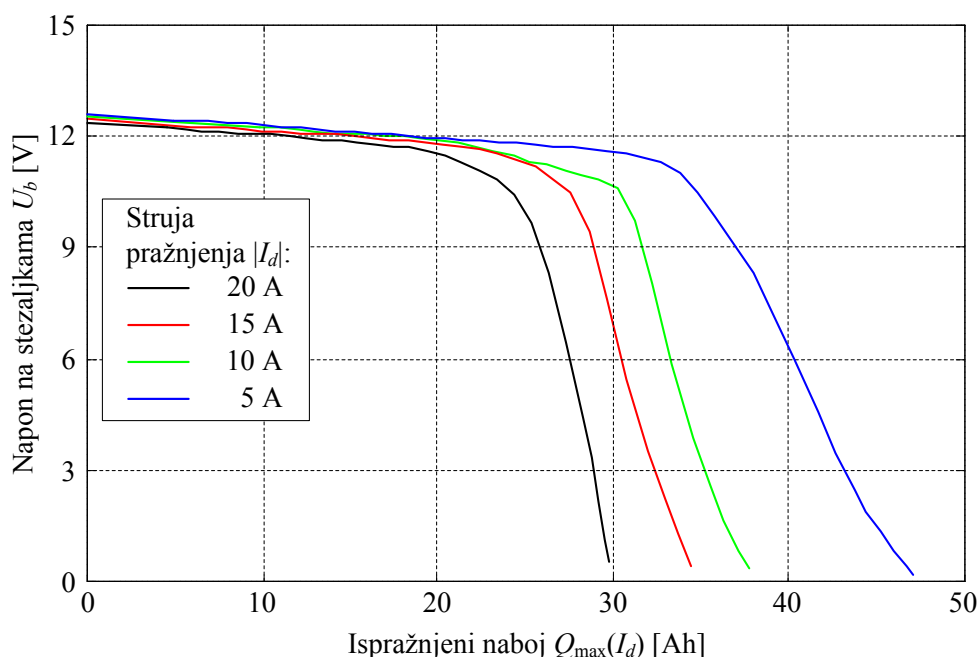


Slika 25. Rezultati bilježenja iznosa napona otvorenog kruga baterije za dva različita iznosa struje pražnjenja baterije

U svrhu snimanja krivulja (ovisnosti) dostupnog nabojskog kapaciteta baterije $Q_{max}(I_b)$ (količine dostupnog naboja pri pražnjenju) o iznosu struje pražnjenja, izvode se testovi pražnjenja baterije konstantnom strujom od „maksimalne“ napunjenosti do trenutka kada baterija više ne može dati zadani iznos struje I_d , odnosno kada napon na stezaljkama poprimi vrlo male iznose. Ispražnjena količina naboja je tada izravno povezana s maksimalnim kapacitetom naboja baterije za određenu struju pražnjenja, $Q_{max}(I_d)$. Dobivene krivulje prikazuje [Slika 26].

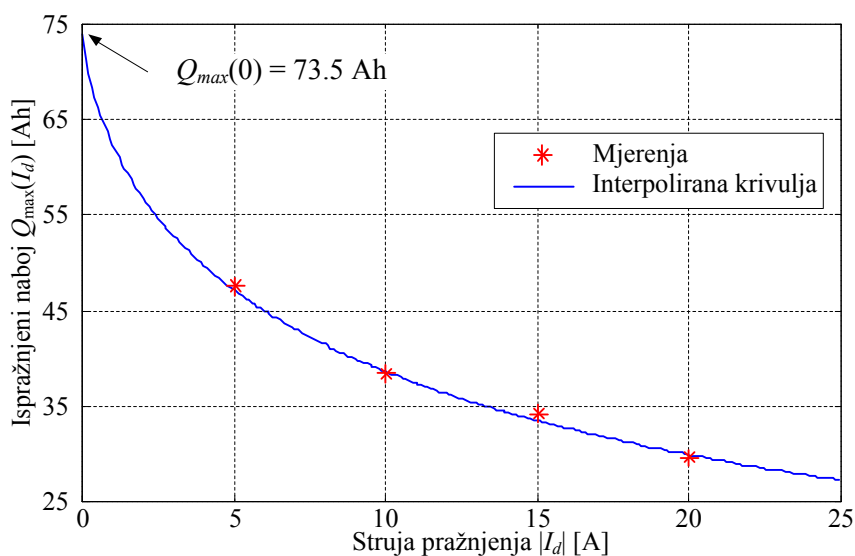
Krivulja ovisnosti kapaciteta baterije o struji pražnjenja je rekonstruirana za SLI olovnu bateriju, za koju proizvođač garantira 55 Ah nazivnog kapaciteta pražnjenja prilikom konstantnog pražnjenja strujom 2.75 A (20 satni test pražnjenja konstantnom strujom) [12]. Točke dobivene mjerenjima, a koje označavaju maksimalni ispražnjeni naboj za pražnjenje strujom od 5 A, 10 A, 15 A i 20 A, prikazane su crvenim zvjezdicama na [Slika 27]. Dobivene vrijednosti su interpolirane metodom najmanjih kvadrata. Parametri dobivene kvazi-empirijske krivulje prema (34), a koja također prikazuje [Slika 27], određeni su pomoću Nelder-Meadovog multidimenzijskog nelinearnog minimizacijskog algoritma bez eksplicitnih

ograničenja (vidi [16] i tamo navedene reference), a koji je implementiran unutar MatlabTM funkcije *fminsearch.m*.



Slika 26. Krivulje pražnjenja baterije

Za odabranu vrijednost $I_{d0} = 5$ A, interpolirana krivulja $Q_{\max}(I_d)$ je karakterizirana slijedećim vrijednostima koeficijenata jednadžbe (34): $K_c = 1.550$, $\delta = 0.702$ i $\alpha_\theta = 0.998$. Krivulja sa [Slika 27] vrlo dobro se poklapa sa točkama dobivenim eksperimentima pražnjenja baterije i daje prilično dobru predikciju nazivnog iznosa kapaciteta baterije danog u specifikacijama proizvođača [17].



Slika 27. Krivulja ovisnosti količine ispražnjenog naboja o struji pražnjenja

6.1.3. Određivanje elektromotorne sile i statičkih krivulja unutarnjeg otpora

Glavni parametri nadomjesnog električnog kruga baterije su estimirani kroz širok raspon radnih točaka. Za estimaciju parametara nadomjesnog strujnog kruga baterije korišten je Kalmanov filtar [18, 19], baziran na za to prikladnim baterijskim testovima.

Dominantne pojave baterije koje ovise o nadomjesnoj elektromotornoj sili E_b i efektima unutarnjeg otpora mogu se opisati sljedećom naponsko-strujnim odnosom (vidi [Slika 23]):

$$u_b = R_b i_b + E_b = R_b i_b + U_{OC} + U_p \quad (35)$$

Napon na stezaljkama baterije pri konstantnoj struji obično karakteriziraju relativno male promjene između relativno bliskih radnih točaka i spora dinamika, a koja je posljedica sporih promjena u parametrima. Brze promjene napona baterije obično su uzrokovane padom napona serijskih otpora, tj. promjenama struje baterije:

$$du_b = R_b di_b \quad (36)$$

što rezultira sljedećim, intuitivnim izrazom za estimaciju unutarnjeg otpora:

$$\hat{R}_b = \frac{du_b}{di_b} \approx \frac{\Delta u_b(k)}{\Delta i_b(k)} \quad (37)$$

gdje su $\Delta u_b(k) = u_b(k) - u_b(k-1)$ i $\Delta i_b(k) = i_b(k) - i_b(k-1)$ numeričke vremenske razlike napona i struje baterije, a koje trebaju biti niskopropusno filtrirane kako bi se smanjila osjetljivost estimacije na šum mjerenja. Glavni nedostatak ovog pristupa je u estimatoru, kojeg karakterizira singularitet tijekom intervala konstantne struje baterije (kada je $\Delta i_b(k) = 0$).

Kako bismo izbjegli dijeljenje sa nulom, jednadžbu estimacije unutarnjeg otpora treba zapisati u sljedećoj formi:

$$\Delta u_b(k) = \hat{R}_b(k) \Delta i_b(k) \quad (38)$$

kako bi se mogla koristiti kao izlaz dinamičkog estimatora, kao što je Kalmanov filtar.

Estimator unutarnjeg otpora baterije temeljen na Kalmanovom filtru počiva na jednadžbi (38) iz koje slijede sljedeće jednadžbe:

$$P(k) = P(k-1) - K(k-1)H(k-1)P(k-1) + Q(k-1) \quad (39)$$

$$H(k) = \Delta i_b(k) = i_b(k) - i_b(k-1) \quad (40)$$

$$K(k) = \frac{P(k)H(k)}{P(k)H^2(k) + r(k)} \quad (41)$$

$$\hat{R}_b(k) = \hat{R}_b(k-1) + K(k)[\Delta u_b(k) - \Delta i_b(k)\hat{R}_b(k-1)] \quad (42)$$

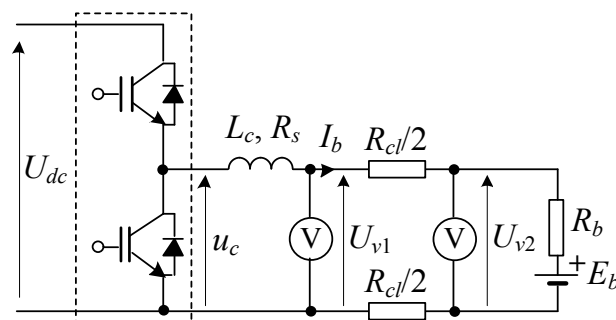
gdje je $Q(k-1)$ željena varijanca perturbacija estimiranog parametra, $r(k)$ je varijanca mjerenog šuma, $P(k)$ je varijanca parametra greške estimacije, $K(k)$ je korigirano pojačanje estimatora i $H(k)$ je mjereno korigirano vremenski promjenjivo pojačanje u okviru Kalmanovog filtra.

U primjeni, varijanca mjerenog šuma $r(k)$ se može podesiti na jedinstvenu vrijednost ($r = 1$), i Kalmanov filter se podesi pomoću željene varijance perturbacija Q u estimiranom parametru otpora R_b . U pravilu postizanje brzog odziva u početnoj fazi estimacije (dobra sposobnost slijeđenja) može se postići držanjem parametra Q na relativno visokim iznosima (veliko podešenje pojačanja K), iza čega slijedi smanjenje parametra Q (malo podešenje pojačanja K). U slučaju pojave singulariteta ($\Delta i_b(k) \rightarrow 0$), može se uvesti intervencija gdje se pojačanje Kalmanovog filtra stavlja u nulu bilo izravno ($K = 0$) ili preko varijance Q ($Q = 0$).

Temeljeno na prethodno opisanom postupku estimacije unutarnjeg otpora baterije R_b , elektromotornu silu baterije E_b možemo dobiti u otvorenom krugu primjenom izraza (35):

$$E_b(k) = u_b(k) - \hat{R}_b(k)i_b(k) \quad (43)$$

U praktičnoj primjeni, ulazi estimatora i_b i u_b se tipično pre-uzorkuju sa relativno visoke frekvencije uzorkovanja (sustav regulacije i akvizicije) na sporiju frekvenciju uzorkovanja, te se niskopropusno filtriraju, te su takvi pogodni za konstrukciju estimatora u pogledu robusnosti na šum.



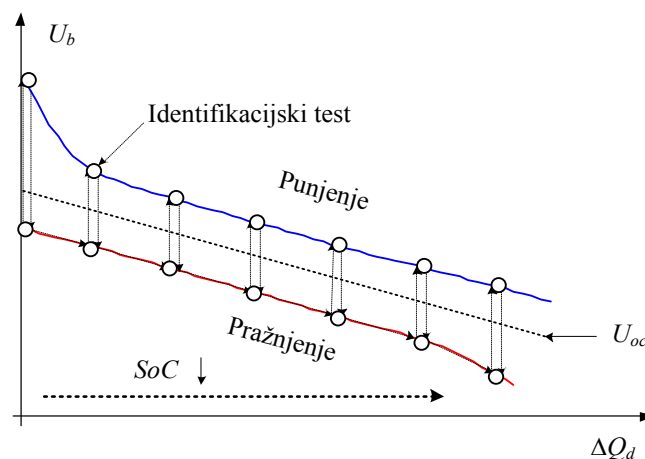
Slika 28. Estimacija parazitskog serijskog otpora

Nadalje, u pravilu treba uzeti u obzir i utjecaj dodatnih (parazitskih) serijskih otpora R_{cl} stezaljki spojenih na priključke baterije i priključnih vodova (strujni kabeli spojeni na bateriju), tako da ih se prethodno procijeni i njihov utjecaj uzme u obzir preko mjerne korelacije. Ovo se može napraviti pomoću testa s konstantnom strujom prikazanog na [Slika 28], pri čemu se baterija puni (ili prazni) strujom I_b . Na osnovi mjerenja pada napona $\Delta U_{drop} = U_{v1} - U_{v2}$ između senzora napona i kontakata baterije, parazitski serijski otpor R_{cl} se računa kao:

$$R_{cl} = \frac{|\Delta U_{drop}|}{|I_b|} \quad (44)$$

Prethodno navedena procedura daje vrijednost otpora $R_{cl} \approx 20 \text{ m}\Omega$, koja je direktno kompenzirana pomoću sustava za akviziciju podataka oduzimanjem pripadajućeg pada napona $R_{cl}i_b$ od zabilježene vrijednosti na stezaljkama baterije u_b .

Identifikacijski eksperimenti za određivanje unutarnjeg otpora baterije i elektromotorne sile, a koji će poslužiti za izradu njihovih statičkih mapa, provode se u regulacijskom krugu struje gdje je referentni signal struje zadan kao trokutasti (pilasti) signal kako bi izazvao periodične perturbacije u struji baterije i naponu na stezaljkama (čime se izbjegava pojava singulariteta u algoritmu estimacije otpora). Eksperimenti su napravljeni za širok raspon struja punjenja/pražnjenja, u relativno širokom spektru radnih točaka s obzirom na stanje napunjenosti baterije. [Slika 29] predočava plan izvođenja eksperimenata. Kako bi se pojednostavila i ubrzala izrada mapa elektromotorne sile i unutarnjih otpora nisu snimane kompletne krivulje punjenja i pražnjenja za cjelokupni raspon stanja napunjenosti baterije. Naime, u svakoj unaprijed određenoj radnoj točki s obzirom na stanje napunjenosti, rađeni su relativno kratki testovi pražnjenja i punjenja sa pilastim signalom reference struje. Pomoću dobivenih rezultata tih kratkih testova moguće je estimirati unutarnji otpor baterije i elektromotornu silu za svaku radnu točku. Radne točke su određene počevši od stanja potpuno pune baterije ($\text{SoC} = 100\%$ ili $\Delta Q_b = 0 \text{ Ah}$), pražnjenjem u segmentima od 5 Ah, pa sve do trenutka kada napon otvorenog kruga padne ispod 11.1 V (prosječno 1.85 V po ćeliji), a što je odabrano kao točka prekida eksperimenta kako se ne bi trajno oštetila baterija. Ovime se postiže poprilično dobra rekonstrukcija statičkih mapa parametara baterije. Eksperimenti se moraju raditi za svaku struju posebno, kako bi se dobile mape za relativno širok raspon struja. Detaljan opis obrade podataka ovako obavljenih eksperimenata dan je u Dodatku A.

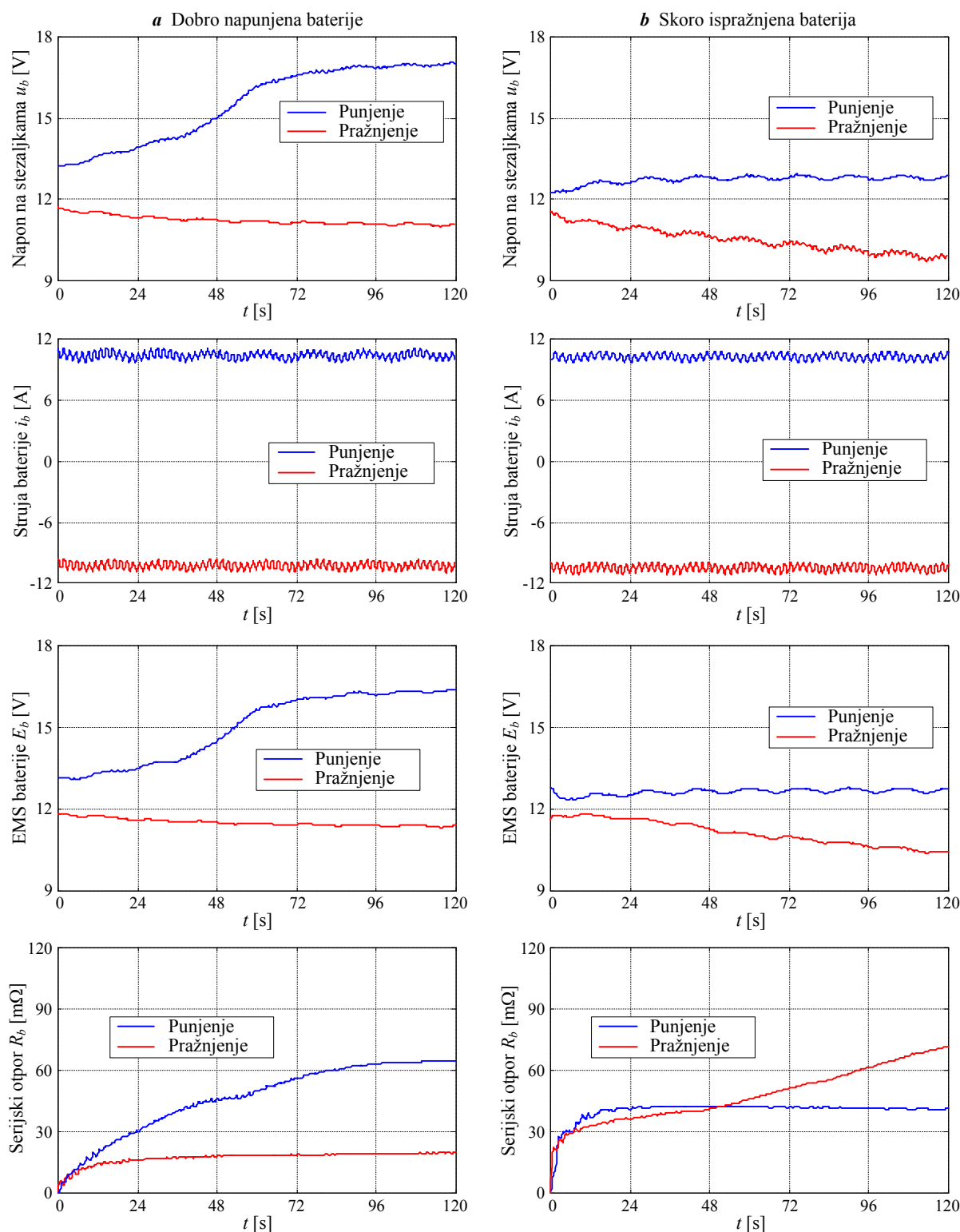


Slika 29. Prikaz plana izvođenja identifikacije elektromotorne sile i unutarnjeg otpora baterije

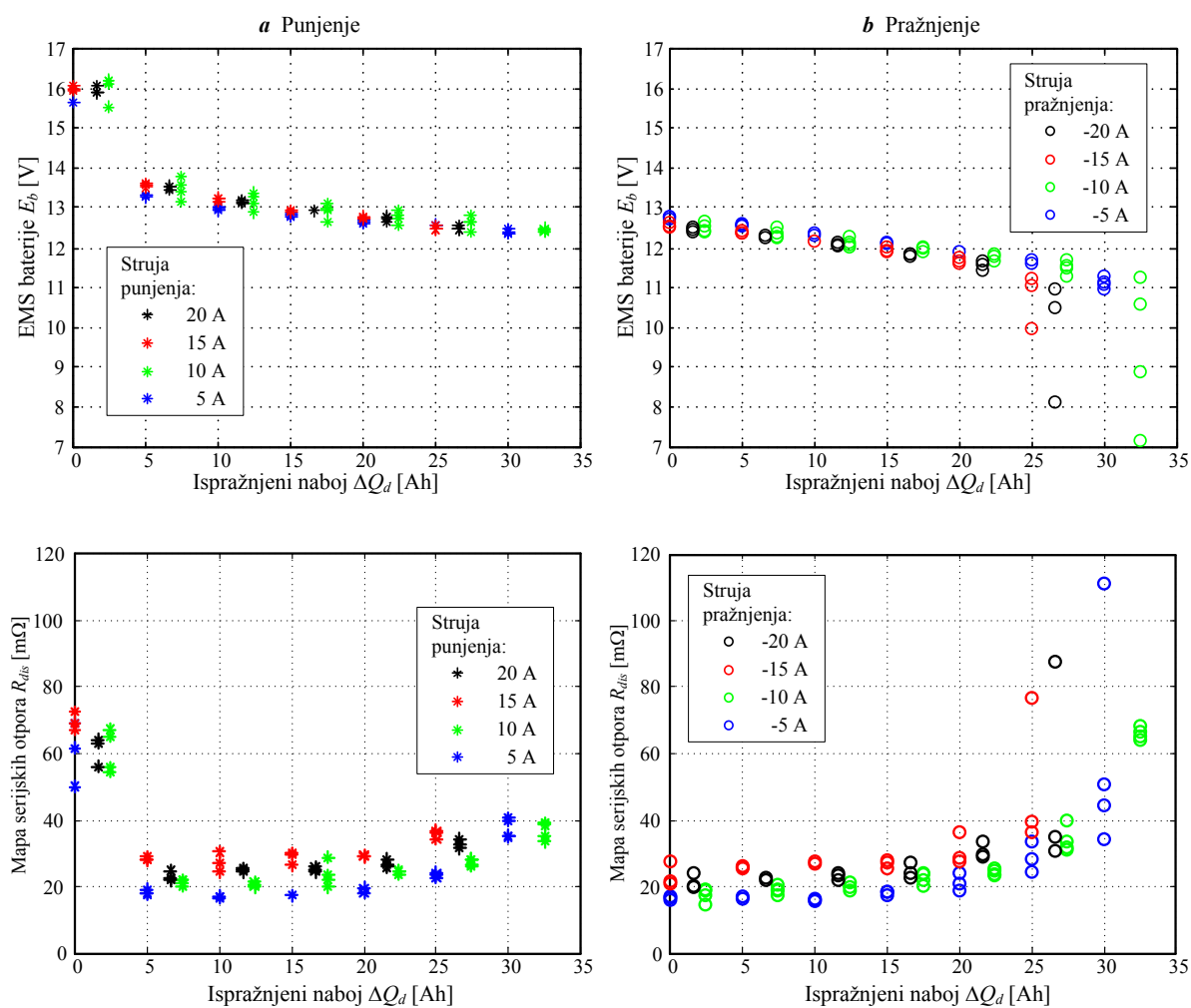
Odzivi struje i napona na stezaljkama baterije dobiveni navedenim eksperimentima prikazuje [Slika 30], zajedno sa pripadajućim rezultatima estimacije unutarnjeg otpora i elektromotorne sile primjenom Kalmanovog filtra. Rezultati pokazuju da odzive napona na stezaljkama uistinu karakteriziraju male perturbacije izazvane pilastom uzbudom struje i pokazuju aperiodsku dinamiku (vidi sljedeće poglavlje). U slučajevima eksternih režima rada (to jest, prepunjavanja i dubokog pražnjenja), odzivi napona na stezaljkama baterije pokazuju značajan porast, odnosno propad, što je u skladu sa teorijskim rezultatima predstavljenima na [Slika 24]. Odzivi estimata Kalmanovog filtra prikazuje [Slika 30]. Dobiveni rezultati se dobro poklapaju sa onima iz literature (vidi [Slika 30]), u smislu da najveći iznosi unutarnjeg otpora odgovaraju prepunjavanju i dubokom pražnjenju baterije, što je dodatno popraćeno značajnim klizanjem elektromotorne sile prema nuli za slučajeve ispražnjene baterije.

Estimirane vrijednosti parametara baterije dobivene su za širok raspon radnih točaka i struja punjenja/ pražnjenja. Dobivene vrijednosti su iskorištene za izradu statičkih mapa (preglednih tablica) unutarnjeg otpora R_b , elektromotorne sile E_b i polarizacijskog napona U_p . Sve estimirane neosrednjene vrijednosti parametara prikazuje [Slika 31]. Statičke krivulje ovisnosti parametara baterije o količini ispražnjenog naboja ΔQ_b za punjenje i pražnjenje pokazuje [Slika 32]. Točke na pojedinoj krivulji (označene sa 'o' i '*') predstavljaju vrijednosti dobivene estimacijom, dok su točke između rekonstruirane primjenom interpolacije kubičnim polinomom kroz dobivene točke. Interpoliranje kubičnim polinomom odabrano je kako bi se dobili blaži prijelazi između točaka statičke krivulje, te kako bi krivulja bila pogodnija za implementaciju u simulacijski model baterije. Dobivene statičke krivulje podudaraju se sa onima iz druge literature, te imaju relativno malo rasipanje. Unutarnji otpor baterije pokazuje

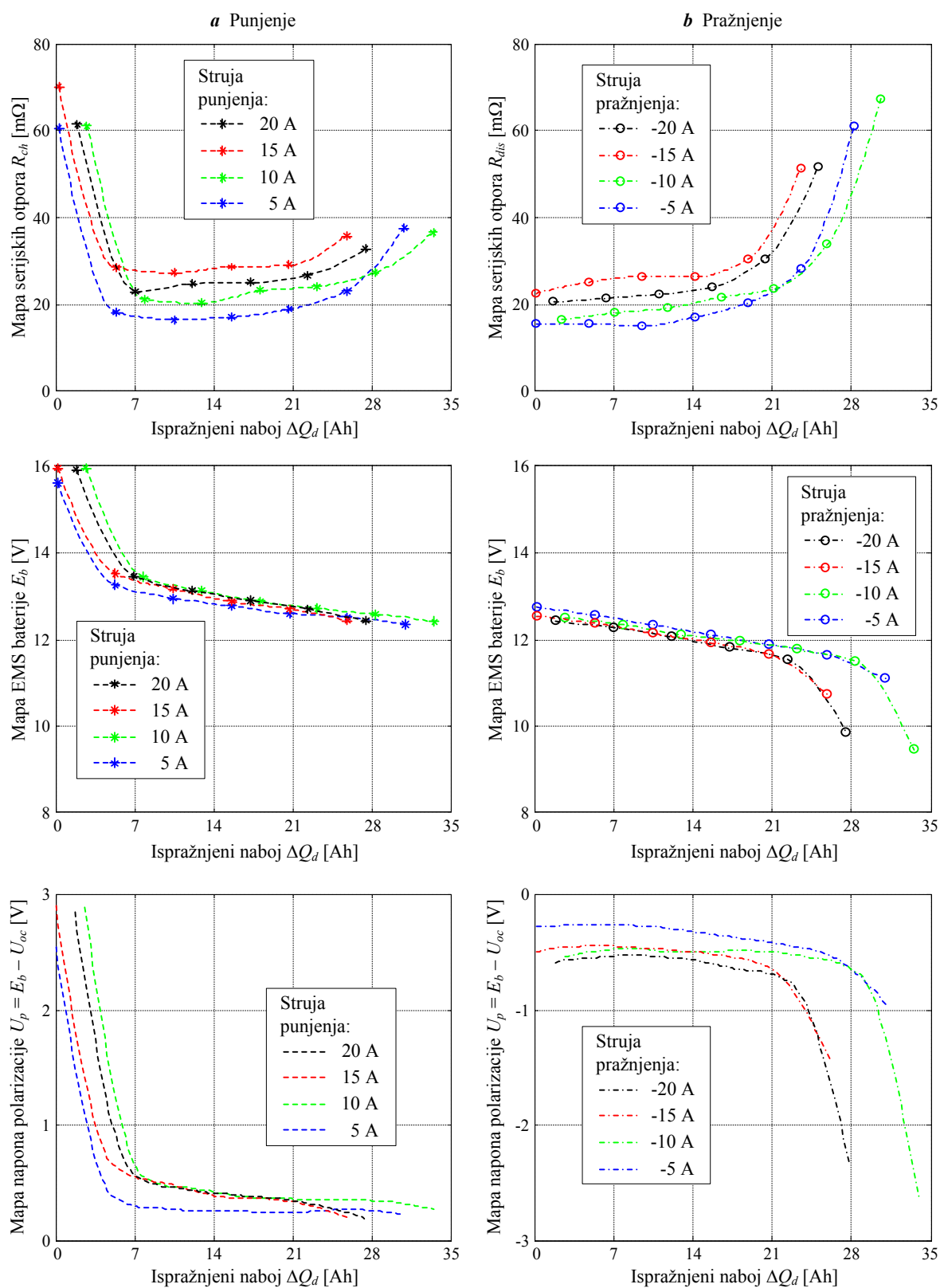
trend porasta sa povećanjem apsolutnog iznosa struje, što za elektromotornu silu i napon polarizacije nije slučaj.



Slika 30. Mjerni signali i rezultati identifikacije punjenja i pražnjenja za dobro napunjenu bateriju (a) i skoro ispražnjenu bateriju (b)



Slika 31. Sve estimirane točke (neosrednjene) pojedinih vrijednosti R_b i E_b u ovisnosti o ΔQ_b za punjenje (a) i pražnjenje (b)



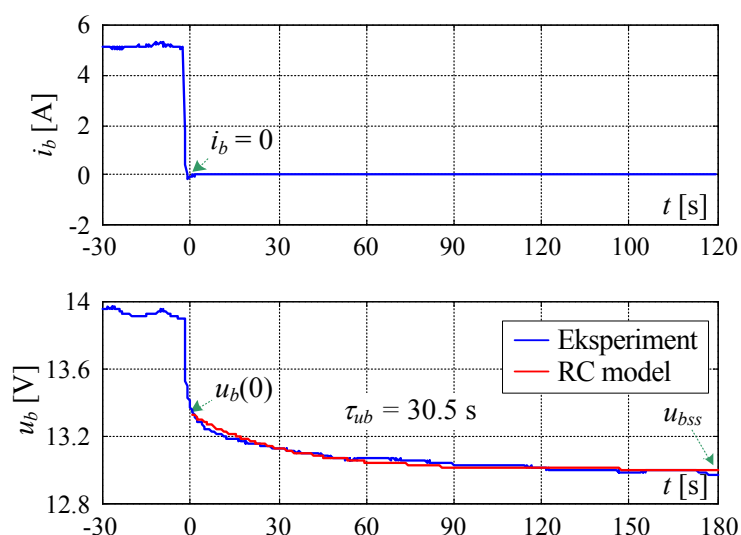
Slika 32. Statičke mape unutarnjeg otpora i EMS, te pripadajućeg napona polarizacije, dobiveni estimacijom rezultata mjerenja

6.1.4. Karakterizacija dinamike napona na stezaljkama baterije

Prma nadomjesnom električnom krugu baterije sa [Slika 23], prijelazni efekti napona na stezaljkama baterije se mogu modelirati pomoću jednostavnog otporničko-kapacitivnog (RC) spoja, sa vremenskom konstantom τ_{ub} . Iznos nadomjesne vremenske konstante τ_{ub} se može procijeniti iz vremenskog odziva napona na stezaljkama baterije po prestanku punjenja/pražnjenja. Naime, kada struja baterije i_b padne na nulu, prijelazna pojava napona na stezaljkama se može opisati sljedećim eksponencijalnom ovisnošću:

$$u_b(t) - u_{bss} = (u_b(t) - u_{bss}) \exp(-t/\tau_{ub}) \quad (45)$$

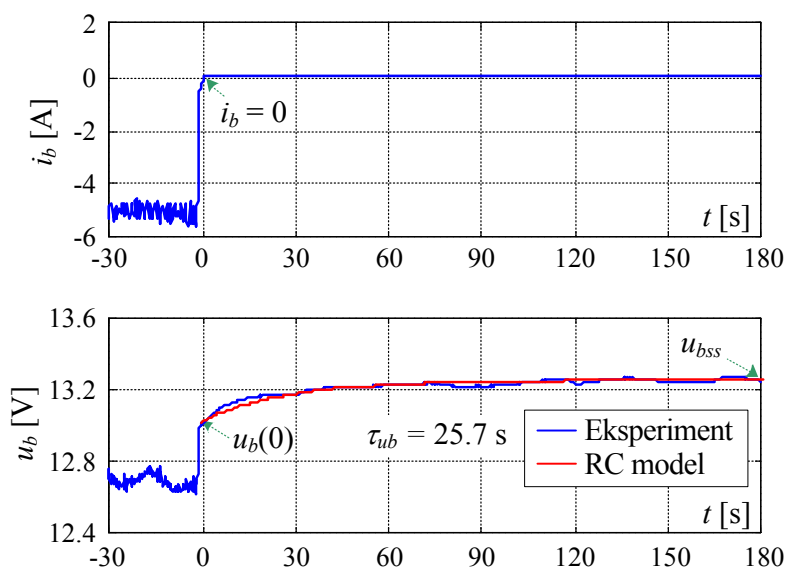
gdje je $u_b(0)$ napon baterije kada struja i_b padne na nulu i u_{bss} je stacionarno stanje napona na stezaljkama baterije (po završetku prijelazne pojave).



Slika 33. Rezultati karakterizacije prijelazne pojave napona na stezaljkama baterije poslije punjenja

[Slika 33] i [Slika 34] prikazuju eksperimentalno snimljene prijelazne pojave napona na stezaljkama koje nastaju nakon prestanka punjenja i pražnjenja baterije. Dobiveni odzivi pokazuju da napon baterije trenutno propadne (u slučaju punjenja) ili skoči (u slučaju pražnjenja), što može biti objašnjeno relativno brzom dinamikom prijelazne pojave struje baterije i pripadajućim padom napona. Nakon što struja baterije padne na nulu (unutar zatvorene petlje regulacije struje), preostala dinamika napona baterije posljedica je jedino internih pojava u bateriji (modelirane nadomjesnim RC članom), a manifestirano sporo dinamičko vladanje napona u_b može se identificirati metodom najmanjih kvadrata temeljem izraza (45). Rezultirajuća interpolirana krivulja (prikazana na [Slika 33] i [Slika 34]) prilično

dobro odgovara eksperimentalnim podacima i razmjerno dobro opisuje dominantnu dinamiku prijelazne pojave napona baterije, dok su iznosi nadomjesnih vremenskih konstanti za punjenje i pražnjenje vrlo slični. Dakle, može se koristiti osrednjena vrijednost predviđene nadomjesne vremenske konstante τ_{ub} za potrebe implementacije u simulacijskom modelu baterije (vidi sljedeći odjeljak).



Slika 34. Rezultati karakterizacije prijelazne pojave napona na stezaljkama baterije poslije pražnjenja

[Tablica 3] iznosi skupne rezultate procjene vremenske konstante stacioniranja napona baterije po završetku punjenja i pražnjenja za različite razine napunjenosti baterije (količine ispražnjenosti naboja ΔQ_b). Zbog razmjerno velikog iznosa rasipanja dobivenih vrijednosti, nije moguće uočiti jasan trend vremenske konstante obzirom na radnu točku (stanje napunjenosti) baterije, te će se u simulacijskom modelu koristiti srednja vrijednost vremenskih konstanti stacioniranja napona baterije iz [Tablica 3].

Tablica 3. Rezultati procjene vremenske konstante stacioniranja napona baterije po završetku punjenja, odnosno pražnjenja.

ΔQ_b [Ah]	τ_{ch} [s]	τ_{dis} [s]
0	68.4	55.9
10	38.9	38.6
20	43.1	67.3
30	42.8	20.7

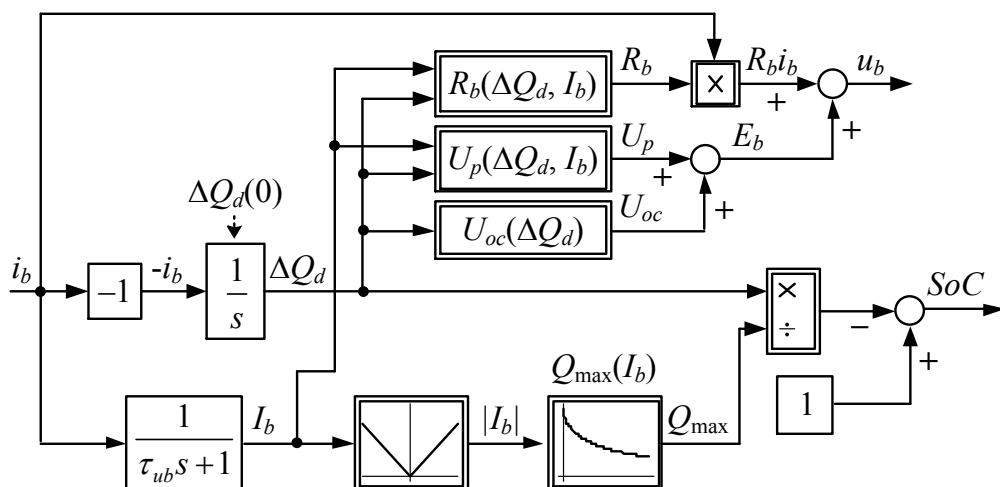
6.1.5. Validacija simulacije kvazi-stacionarnog modela baterije

Simulacijski (kvazi-stacionarni) model baterije izgrađen je uz pretpostavku da je struja ulazna veličina u model. Blokovski dijagram takvog modela baterije prikazuje [Slika 35], gdje je ispražnjeni naboj ΔQ_b glavna varijabla stanja, pomoću koje se računaju parametri kvazi-statičkog modela R_b , U_{oc} i U_p . Stanje napunjenosti se računa prema jednadžbi (30), bazirano na nabojskom kapacitetu baterije prema (34), implementirano je u sustav uvođenjem krivulje maksimalne količine naboja sa strujom I_b na ulazu i maksimalnom količinom ispražnjenog naboja za tu struju na izlazu. Mjerena struja se prije određivanja maksimalnog naboja propušta kroz niskopropusni filter kako bi se izgledila (kako se i preporučuje u [12]). Budući da je iskustveno poznato da su brzine (intenziteti) reverzibilnih elektrokemijskih pojava u bateriji približno jednake za punjenje i pražnjenje, te da prvenstveno ovise o iznosu struje punjenja/pražnjenja baterije, pragmatično je odlučeno da kapacitet naboja Q_{max} bude jednak za pozitivne i negativne vrijednosti struje². Jednadžba napona na stezaljkama baterije (35) je implementirana pomoću dobivenih statičkih mapa parametara baterije $R_b(SoC, I_b)$, $U_p(SoC, I_b)$ i $U_{oc}(SoC)$ kako prikazuje [Slika 32]. R_b i U_p na ulazu imaju filtriranu struju I_b što omogućuje i rekonstrukciju prijelaznih pojava napona na stezaljkama baterije za promjenjivu struju baterije i_b . Statičke mape R_b i U_p mogu se uvrstiti u model u punoj formi kao 2D pregledne (*engl.* look-up) tablice (kao na [Slika 32]) u ovisnosti o iznosu i smjeru struje, ili pojednostavljeno sa osrednjenim vrijednostima u tablicama posebno za punjenje i posebno za pražnjenje, gdje je jedino bitan predznak struje baterije. Simulacijski modeli baterije napravljeni su u programu Matlab/Simulink i prikazani u Dodatku B.

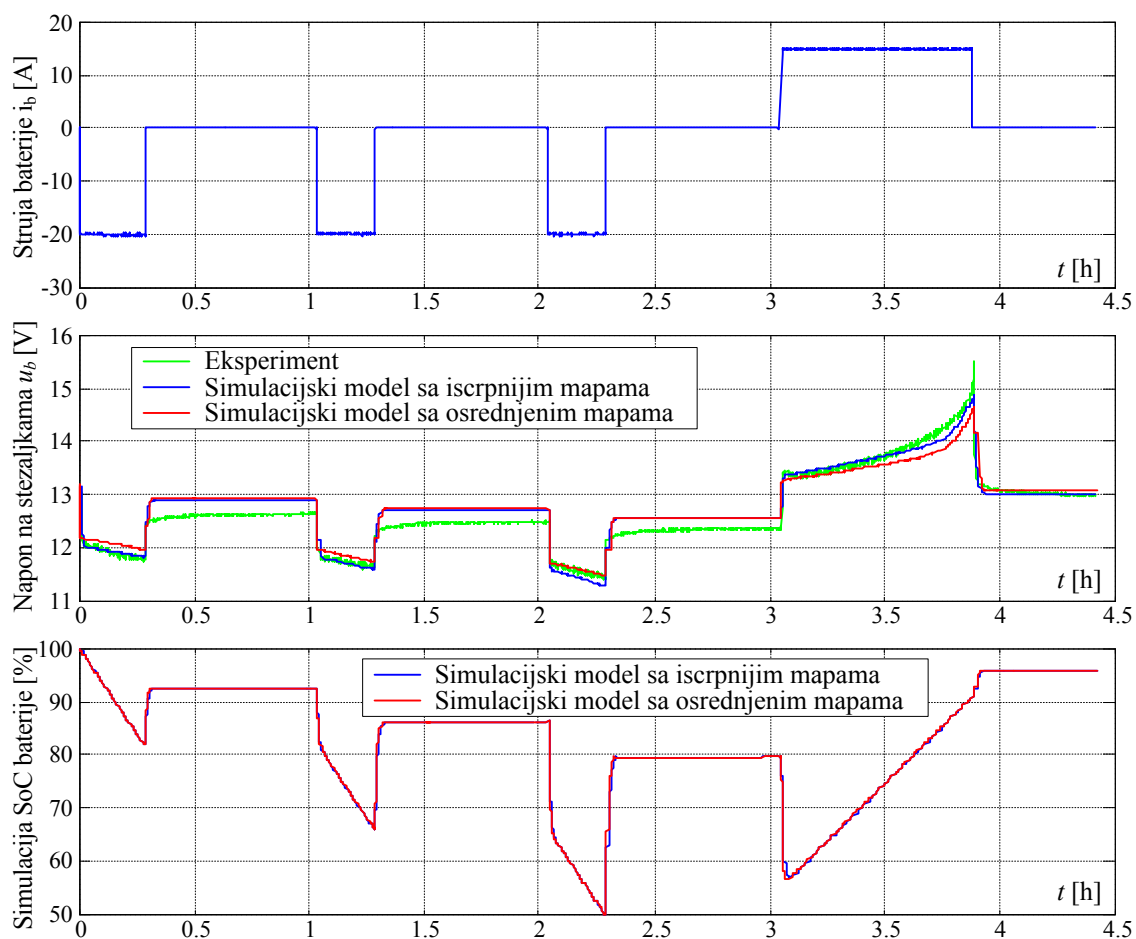
[Slika 36] prikazuje usporedbu eksperimentalnih odziva i rezultata predloženog simulacijskog modela za razmatrani pulsni profil struje. Rezultati pokazuju da model sa iscrpnijim podacima (sa iscrpnijim 2D lookup tablicama za R_b i U_p) pokazuje bolje slijeđenje eksperimentalno zabilježenih vrijednosti napona na stezaljkama baterije u_b , s obzirom na jednostavniji model (baziran na osrednjenim vrijednostima R_b i U_p). Naponsko odstupanje simulacijskog modela baterije prilikom mirovanja baterije ($i_b = 0$) nakon pražnjenja strujom velikog iznosa pripisuje se grešci mape napona polarizacije pri malim iznosima struje i mogućim nesigurnostima određivanja početnih uvjeta ispražnjenog naboja. Predikcija (estimacija) stanja napunjenosti baterije u oba modela je identična jer SoC jedino ovisi o

² Za navedeni oblik modela baterije prema [12], nekoliko vanjskih referenci opisuje simulacijski model temeljen na izrazima (30) i (34) i nadomjesnom električnom krugu sličnom onome prikazanom na [Slika 23]. Međutim, niti jedna od navedenih referenci ne opisuje detaljno kako je implementiran model nabojskog kapaciteta baterije za punjenje i pražnjenje.

nabojskom kapacitetu baterije $Q_{\max}(I_b)$ za danu struju, te količini ispražnjenog naboja ΔQ_b (tj. neovisno je o iznosu napona na stezaljkama baterije).



Slika 35. Blokovski dijagram kvazi-statičkog modela baterije sa strujom na ulazu



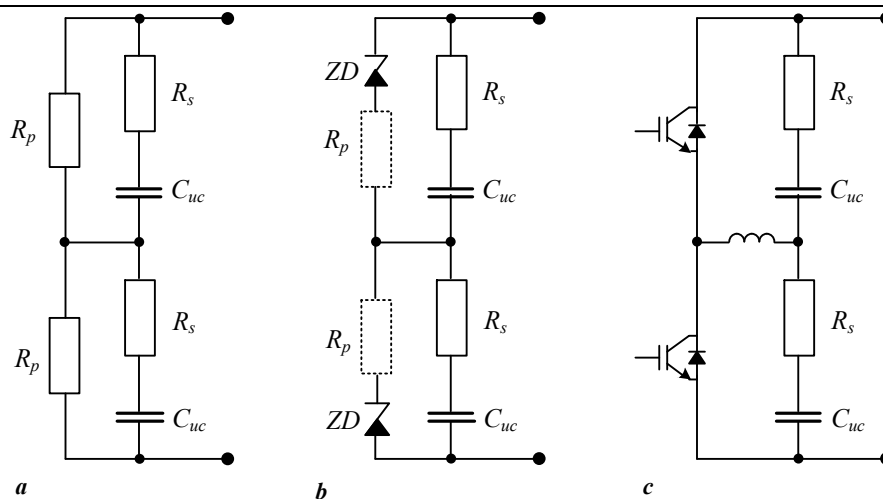
Slika 36. Usporedba eksperimentalnih odziva sa odzivima simulacijskih modela sa iscrpnijim i osrednjenim statičkim mapama unutarnjeg otpora i napona polarizacije baterije

6.2. Identifikacija matematičkog modela ultrakondenzatora

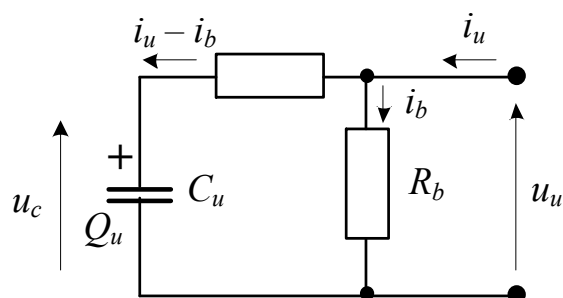
U ovom podpoglavlju opisan je postupak određivanja parametara modela ultrakondenzatora za primjene u regulaciji temeljen na nadomjesnom električnom krugu. Identifikacija modela je provedena u zatvorenoj petlji regulacije struje pomoću standardnih ispitnih signala, kao što su skokoviti i pilasti signal. Dobiveni parametri nadomjesnog električnog kruga upotrijebljeni su za izradu simulacijskog modela ultrakondenzatora, validiranog na eksperimentalnim podacima.

6.2.1. Nadomjesni strujni krug ultrakondenzatora

Ultrakondenzatorska ćelija obično se opisuje (kako je navedeno u podpoglavlju 3.3), pomoću nadomjesnog otporničko-kapacitivnog (RC) strujnog kruga kako prikazuje [Slika 7]. Nadomjesni električni krug uključuje efekte kapacitivnosti ultrakondenzatora (kapaciteta C_{uc}), serijski otpor R_s koji simbolizira ukupne toplinske gubitke snage tijekom punjenja/pražnjenja i paralelni otpor R_p koji simbolizira samopražnjenje ultrakondenzatora zbog ne-idealnog izolacijskog razdvajajućeg sloja. Međutim, u slučaju ultrakondenzatorskog modula koji obuhvaća veći broj ćelija spojenih u serijsko-paralelne konfiguracije, nužno uravnoteženje (balansiranje) napona pojedine ćelije (odnosno njenog naboja) izaziva niz problema zbog prilično striktnog ograničenja napona ćelije ultrakondenzatora ($u_{c,max} < 3.5 \text{ V}$). U svrhu uravnoteženja napona međusobno serijski spojenih ćelija predloženi su različiti pomoćni strujni krugovi, od kojih su neki bazirani na čistom pasivnom balansiranju otporničkim komponentama (vidi [Slika 37,a]), djelomično aktivnim balansiranju sa Zennerovom diodom (vidi [Slika 37,b]) i u potpunosti aktivnom balansiranju sa DC/DC frekvencijskim pretvaračem (vidi [Slika 37,c]). U slučaju pasivnog i djelomično aktivnog balansiranja sa aktiviranim Zennerovim diodama, uravnoteženje ćelija može biti predstavljeno nadomjesnim otporom R_b spojenim u paralelu sa „idealnim“ RC ultrakondenzatorskim modelom koji uključuje nadomjesni serijski otpor R_u i nadomjesnu kapacitivnost C_u , kako prikazuje [Slika 38].



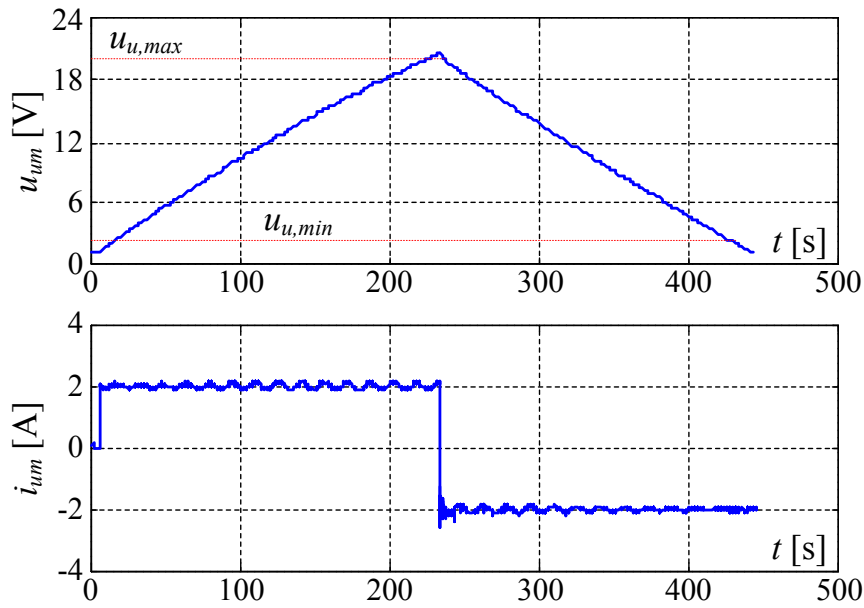
Slika 37. Krugovi za uravnoteženje ultrakondenzatorskog modula sa dvije serijski spojene ćelije: pasivno (a), djelomično aktivno (b) i aktivno (c) balansiranje



Slika 38. Ekvivalentni električni krug ultrakondenzatorskog modula

6.2.2. Eksperimenti punjenja/pražnjenja konstantnom strujom i samopražnjenja

Nadomjesna kapacitivnost C_u ultrakondenzatorskog modula može se estimirati pomoću eksperimenta punjenja/pražnjenja kako prikazuje [Slika 39]. Ultrakondenzatorski modul bi trebao imati nominalnu kapacitivnost u iznosu $C_u = 22.2 \text{ F}$ (podatak temeljen na podacima proizvođača, [20]). Međutim, stvarna kapacitivnost može varirati u odnosu na nominalnu zbog proizvodnih tolerancija i varijacija ovisnih o naponu.



Slika 39. Odzivi ultrakondenzatora na test punjenja/pražnjenja ultrakondenzatora konstantnom strujom

Postupak za empirijsko određivanje kapacitivnosti (kapaciteta) temelji se na odnosima između napona na stezaljkama ultrakondenzatora u_u , ulazne struje i_u i struji uravnoteženja i_b ovisnoj o naponu, a koji vrijede za nadomjesni električni krug sa [Slika 38]:

$$\frac{du_u}{dt} = R_u \frac{di_u}{dt} - R_u \frac{di_b}{dt} + \frac{i_u - i_b}{C_u} \quad (46)$$

Za slučaj punjenja/pražnjenja ultrakondenzatora konstantnom strujom I_u , gornja jednačba se može zapisati kao:

$$\frac{du_u}{dt} = -R_u \frac{di_b}{dt} + \frac{i_u - i_b}{C_u} \quad (47)$$

Kombiniranjem izraza za slučaj punjenja i pražnjenja i uvrštavanjem $i_b(u_u) = u_u/R_b$ u gornji izraz, možemo izbaciti naponski ovisan član ultrakondenzatora $u_u/(R_b C_u)$ čime se dobije jednostavan kvazi-statički izraz za kapacitivnost ultrakondenzatora:

$$C_u(u_u) = \frac{1}{1 + \frac{R_u}{R_b}} \frac{I_{u,ch} - I_{u,dis}}{\dot{u}_{u,ch}(u_u) - \dot{u}_{u,dis}(u_u)} \quad (47)$$

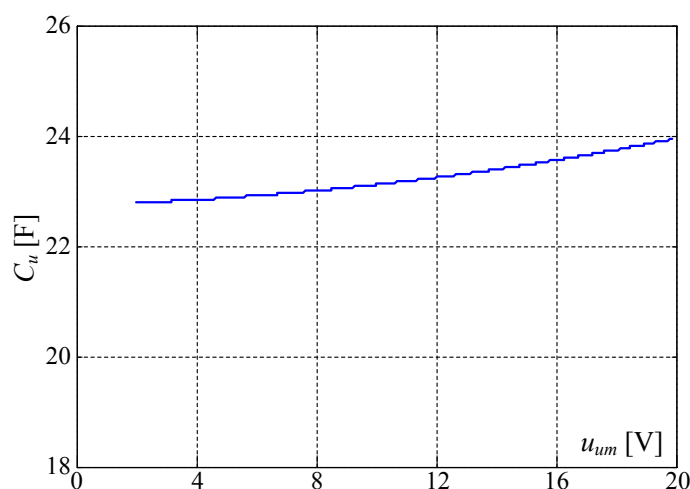
gdje se, ako se uzme u obzir da je $R_u \ll R_b$ (vidi slijedeće podpoglavlje), prethodni izraz može zapisati kao:

$$C_u(u_u) \approx \frac{I_{u,chg} - I_{u,dis}}{\dot{u}_{u,chg}(u_u) - \dot{u}_{u,dis}(u_u)} \quad (48)$$

Gornji izraz za estimaciju nadomjesne kapacitivnosti interpolira odzive punjenja/pražnjenja napona ultrakondenzatorskog modula sa [Slika 39], polinomom drugog reda preko proizvoljne granice napona $u_u \in [u_{u,min}, u_{u,max}]$ kako bi izračunao nezašumljene vremenske derivacije napona. Dobivena krivulja ovisnosti kapacitivnosti ultrakondenzatora o naponu $C_u(u_u)$ kako prikazuje [Slika 40]. Na slici je vidljivo da je estimirana kapacitivnost vrlo blizu nominalnom iznosu, ali pokazuje tendenciju povećanja sa porastom napona na stezaljkama ultrakondenzatora, što je u skladu sa podacima predstavljenim u [21].

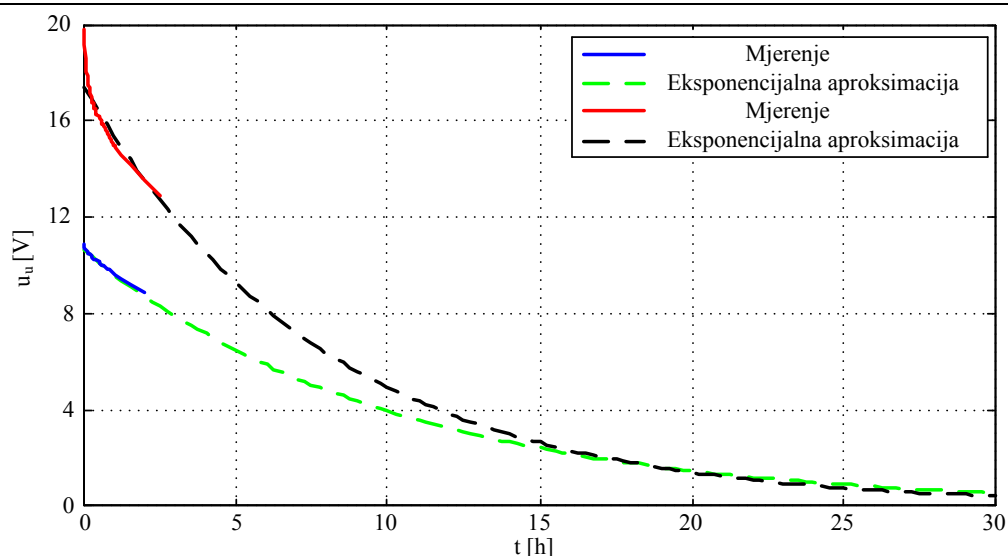
Kako bi se procijenila sposobnost držanje naboja ultrakondenzatorskog modula u praznom hodu, ultrakondenzatorski modul se prvo napunio do unaprijed definiranog iznosa napona, nakon čega je odspojen od izvora napajanja i pušten da se polako prazni preko balansirajućih krugova i prisutnih efekata „curenja“. Rezultati testova pražnjenja sa početnim naponom ultrakondenzatorskog modula približno 11 V i 20 V iznosi [

Slika 41].



Slika 40. Estimirana kapacitivnost ultrakondenzatora u ovisnosti o naponu

Rezultati pokazuju da nakon početnog, relativno naglog pada (posebno istaknutog pri većim iznosima početnog napona), napon ultrakondenzatorskog modula monotono opada sa predviđenim vremenom pražnjenja oko 30 sati (dobiveno jednostavnom eksponencijalnom ekstrapolacijom eksperimentalnih podataka).



Slika 41. Krivulja samopražnjenja ultrakondenzatorskog modula

6.2.3. Identifikacija ARX modela ultrakondenzatora

Estimacija parametara modela ultrakondenzatora temelji se na identifikacijskom ARX modelu sa nadomjesnim diskretnim vremenom i identifikacijskom pristupu procjene parametara metodom najmanjih kvadrata - LS („Least squares“). Dobiveni ARX model je validiran primjenom analize autokorelacije pogreške predikcije modela.

Izvod vremenski-diskretnog modela ultrakondenzatora pogodnog za potrebe identifikacije temeljene na nadomjesnom strujnom krugu ultrakondenzatora sa [Slika 38], temelji se na kompleksnoj admitanciji $Y(s)$ koja je u Laplace-ovom s području dana kako slijedi:

$$Y(s) = \frac{i_u(s)}{u_u(s)} = \frac{1}{R_b} + \frac{1}{R_u} \frac{s}{s + \frac{1}{R_u C_u}} \quad (49)$$

Kako gore navedeni model sadrži tri parametra (R_s , R_b i C_u) u daljnjim razmatranjima nazivamo ga troparametarski model. Vremenski-diskretni ekvivalent troparametarskog modela procesa (49) dobije se primjenom Z-transformacije uz pretpostavku ekstrapolatora nultog reda (ZOH) na ulazu procesa (T – vrijeme uzorkovanja):

$$Y(z) = \frac{i_u(z)}{u_u(z)} = Z \left\{ \frac{1 - e^{-sT}}{s} Y(s) \right\} = \frac{z - 1}{z} \left\{ \frac{1}{R_b} + \frac{1}{R_u} \frac{s}{s + \frac{1}{R_u C_u}} \right\} \quad (50)$$

koji nakon sređivanja rezultira slijedećom prijenosnom funkcijom modela procesa:

$$Y(z) = \frac{i_u(z)}{u_u(z)} = \frac{\left(\frac{1}{R_b} + \frac{1}{R_u}\right)z - \left(\frac{a}{R_b} + \frac{1}{R_u}\right)}{z - a} = \frac{b_1 z + b_0}{z - a} \quad (51)$$

gdje je $a = \exp[-T/(R_u C_u)]$. Imajući na umu da se u slučaju zanemarive struje balansiranja i_b (tj. $R_b \rightarrow \infty$, vidi [Slika 38]) ovo može rezultirati dodatnim pojednostavljenjem modela koji tada nazivamo dvoparametarski model:

$$Y(z) = \frac{i_u(z)}{u_u(z)} = \frac{1}{R_u} \frac{z - 1}{z - a} = b_1 \frac{z - 1}{z - a} \quad (52)$$

Odnos između parametara originalnog modela u kontinuiranom vremenu i modela u diskretnom vremenu prikazuje [Tablica 4].

Tablica 4. Odnosi između parametara vremenski kontinuiranog i vremenski diskretnog modela

	Otpor uravnoteženja R_b	Serijski otpor R_u	Kapacitivnost C_u
Troparametarski model	$R_b = \frac{1 - a}{b_1 - b_0}$	$R_u = \left(b_1 - \frac{1}{R_b}\right)^{-1}$	$C_u = \frac{-T}{R_u \ln(a)}$
Dvoparametarski model	-	$R_u = 1/b_1$	

Parametri modela ultrakondenzatora estimirani su korištenjem identifikacijskog pristupa procjene parametara metodom najmanjih kvadrata (LS), gdje su modeli ultrakondenzatora zapisani u standardnom ARX obliku [19]. Za slučaj troparametarskog modela, ARX model procesa ima slijedeći oblik (k – korak uzorkovanja, q^{-1} – jedinica operatora kašnjenja):

$$(1 - aq^{-1})i_u(k) = (b_1 + b_0 q^{-1})u_u(k) + e(k) \quad (53)$$

gdje je $e(k)$ pogreška predikcije ARX modela (idealno „bijeli šum“). Za jednostavniji dvoparametarski model, ARX model procesa se zapisuje kao:

$$(1 - aq^{-1})i_u(k) = b_1 \Delta u_u(k) + e(k) \quad (54)$$

gdje je $\Delta u_u(k) = u_u(k) - u_u(k - 1)$ numerička diferencija napona ultrakondenzatora.

Identifikacija ARX modela procesa (53) i (54) napravljena je unutar zatvorene regulacijske petlje struje kako bi se spriječilo da struja ultrakondenzatora dosegne prekomjerne vrijednosti (do čega bi moglo doći kada bi se eksperimenti radili u otvorenoj

petlji). Identifikacijski test osmišljen je tako da se postavi pogodna referenca struje ultrakondenzatora, poput signala trokutastog oblika sa DC odstupanjem, kako prikazuje [Slika 42,a]. Test pražnjenja je odabran iz sigurnosnih razloga (kako ne bi doveli ultrakondenzatorski modul do previsokih iznosa napona). Odabrana je relativno mala frekvencija trokutaste komponente reference struje jer zbog velikog iznosa kapacitivnosti ultrakondenzatora (estimirano iz testa punjenja/pražnjenja u prethodnom podpoglavlju) proizlazi da dinamički model ultrakondenzatora ima razmjerno uzak frekvencijski propusni opseg (*engl.* bandwidth) $\Omega_{bw} \approx (R_u C_u)^{-1}$. Konačni rezultati estimacije parametara identifikacijskog ARX modela RC kruga ultrakondenzatorskog modula prikazuje [Slika 42,b]. Rezultati pokazuju da su kapacitivnost ultrakondenzatora C_u i serijski otpor R_u za složeniji troparametarski model i jednostavniji dvoparametarski model imaju vrlo slične iznose. Dobiveni rezultat ne iznenađuje, jer je otpor balansiranja R_b za tri reda veličine veći u usporedbi sa serijskim otporom R_u , što ima relativno mali utjecaj na dinamiku nadomjesnog RC kruga ultrakondenzatorskog modula.

Identificirani ARX modeli procesa provjereni su na posebno snimljenim podacima iz analize parametara predikcije pogreške ARX modela:

$$e_i(kT) = i_u(kT) - \hat{i}_u(kT) \quad (55)$$

gdje $\hat{i}_u(kT)$ označava jedan korak ispred predikcije ARX modela temeljeno na (53) ili (54).

Kako bi identificirani model „idealno“ zadovoljio validacijski test, idealna pogreška predikcije treba biti potpuno nekorelirana. Razina korelacije prikazana je pomoću normalizirane pogreške predikcije autokorelacijske funkcije:

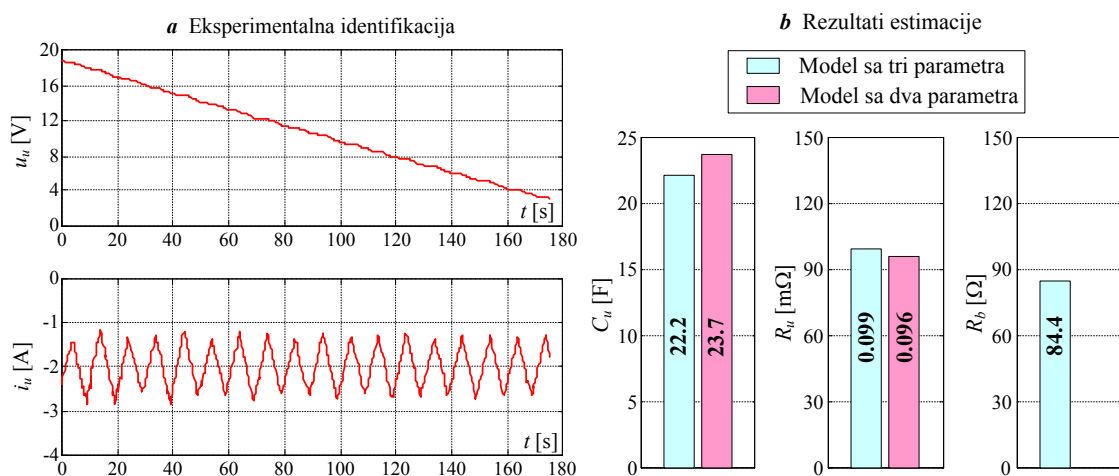
$$\bar{r}_{ee}(\kappa T) = \frac{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N-\kappa} e_i(kT) e_i(kT + \kappa T)}{\max \left\{ \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N-\kappa} e_i(kT) e_i(kT + \kappa T) \right\}} \quad (56)$$

koja u idealnom slučaju kada pogreška predikcije nije korelirana (idealno „bijeli šum“) zadovoljava slijedeće uvjete:

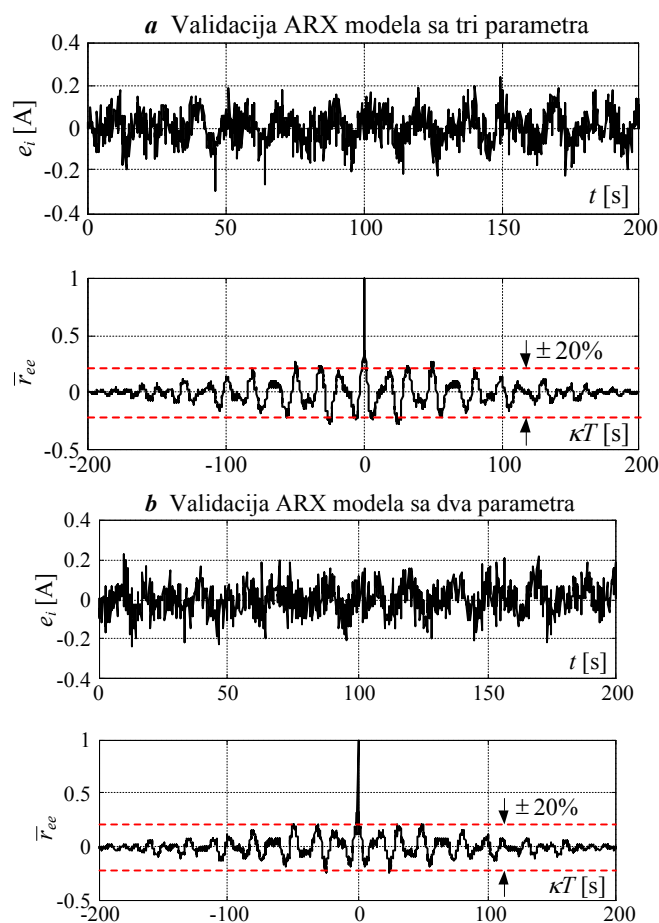
$$\bar{r}_{ee}(\kappa T) = \begin{cases} 1 & \text{za } \kappa = 0 \\ 0 & \text{za } \kappa \neq 0 \end{cases} \quad (57)$$

Rezultati analize koreliranosti pogreške predikcije prikazuje [Slika 43]. Pogreška predikcije za troparametarski i dvoparametarski model RC kruga je relativno nekorelirana (odstupanje s obzirom na idealnu predikcijsku pogrešku autokorelacijske funkcije (57) je

pretežno manje od 20%), uz nešto nižu razinu korelacije dobivene za jednostavniji dvoparametarski model (54). Programski kod korišten za identifikaciju ARX modela dan je u Dodatku C.



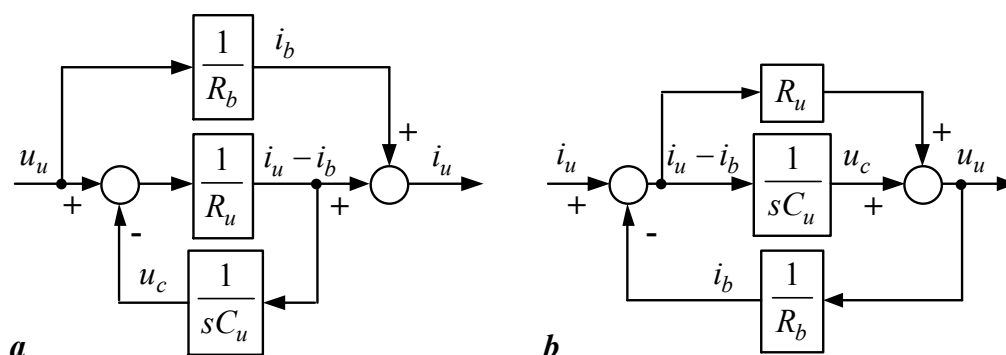
Slika 42. Odzivi ultrakondenzatorskog modula na promjenjivi profil struje (a) i rezultati estimacije parametara temeljene na ARX modelu (b)



Slika 43. Rezultati validacije ARX modela ultrakondenzatora

6.2.4. Validacija simulacijskog modela ultrakondenzatora

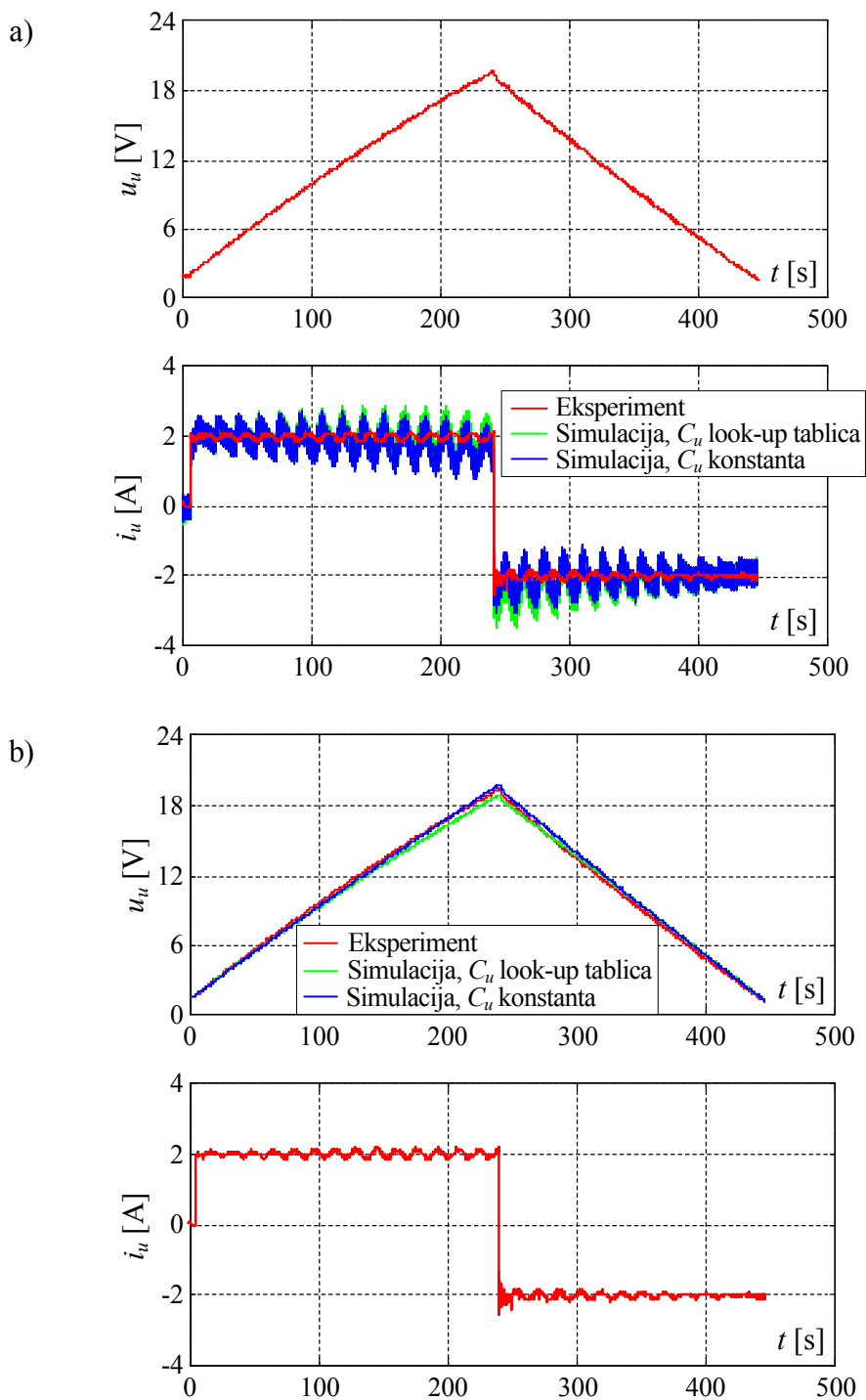
Estimirani parametri nadomjesnog električnog kruga ultrakondenzatorskog modula korišteni su za izgradnju simulacijskog modela ultrakondenzatorskog modula. [Slika 44] prikazuje dvije inačice simulacijskog modela ultrakondenzatorskog modula, od kojih jedna prikazuje model sa strujom na ulazu u model, a druga prikazuje model sa naponom na ulazu. Model sa naponom na ulazu pogodniji je za analizu punjenja/pražnjenja ultrakondenzatorskog modula, dok je model sa strujom na ulazu pogodniji za izravno praćenje stanja napunjenosti i izradu estimatora stanja napunjenosti ultrakondenzatorskog modula. Model sa naponom na ulazu sadrži implicitnu derivaciju po vremenu (integrator u povratnoj vezi kako prikazuje [Slika 44,a]), što može rezultirati pretjeranom razinom šuma na izlazu (struji i_u) ako u ulazu modela (u_u) postoji šum mjerenja. S druge strane, model sa strujom na ulazu sadrži algebarsku petlju (put kroz serijski otpor R_u i otpor uravnoteženja $1/R_b$) što treba uzeti u obzir prilikom izrade simulacijskog modela. Oba simulacijska modela mogu biti temeljena na konstantnoj vrijednosti ili naponski ovisnom kapacitetu ultrakondenzatora C_u . U slučaju naponski ovisnog kapaciteta ultrakondenzatora C_u , on se implementira u simulacijskom modelu u obliku pregledne (look-up) tablice temeljene na eksperimentalno dobivenim podacima prikazuje [Slika 40]. Matlab/Simulink modeli sustava prikazani su u Dodatku D.



Slika 44. Dinamički model ultrakondenzatora: a) model sa naponom na ulazu i b) model sa strujom na ulazu

[Slika 45] prikazuje usporedbu simulacijskih rezultata modela ultrakondenzatorskog modula sa strujom i naponom na ulazima sa signalima struje i napona dobivenih pomoću eksperimenata. Odziv modela sa naponom na ulazu (vidi [Slika 45,a]) pokazuje dobro slijeđenje dominantne dinamike napona ultrakondenzatora i stacionarne vrijednosti struje, ali mu je simulirani signal struje i_u opterećen šumom (zbog učinka pojačanja mjernog šuma uslijed implicitnog derivatora u modelu). Model sa strujom na ulazu nema problema sa

šumom, kao što je prikazuje [Slika 45,b], a također je karakteriziran relativno dobrim praćenjem eksperimentalno dobivenog signala napona na stezaljkama ultrakondenzatora. Odzivi sa [Slika 45] također prikazuju da promjene kapaciteta ultrakondenzatora ovisne o naponu nemaju velikog utjecaja na točnost slijeđenja modela u odnosu na eksperiment (jer je relativna promjena C_u razmjerno mala, kako prikazuje [Slika 40]).



Slika 45. Simulacijski odzivi modela ultrakondenzatora sa naponom na ulazu (a) i sa strujom na ulazu (b) na punjenje/pražnjenje konstantnom strujom

7. ZAKLJUČAK

U ovome radu predstavljani su sustavi za skladištenje energije temeljeni na baterijama i ultrakondenzatorima, pogodni za primjenu u izoliranim DC mikromrežama. U prvom dijelu rada analizirani su navedeni sustavi za skladištenje energije s obzirom na temeljne mehanizme za pohranu energije, te su predstavljeni prema glavnim aspektima njihovog korištenja poput učinkovitosti, kapaciteta energije/snage i pouzdanosti. Razvoj matematičkih modela baterije i ultrakondenzatora usmjeren je prema aplikacijama za nadzor regulacije tokova energije, uključujući nadzor stanja napunjenosti (*SoC*) sustava za skladištenje energije.

Opisan je računalom upravljani laboratorijski postav za ispitivanje baterija i ultrakondenzatora zajedno sa dvo-kvadratnim DC/DC pretvaračima upravljanim razmjerno jednostavnim (jeftinim) programabilnim logičkim kontrolerom (PLC). Nadzor rada i akvizicija podataka na postavu temelji se na National Instrumentsovom hardveru i realizirana je u programskom okruženju LabView. U svrhu precizne regulacije struje baterije/ultrakondenzatora projektiran je regulator struje s integrirajućim (I) djelovanjem, dok je za potrebe regulacije napona DC međukruga tijekom pražnjenja projektiran pomoćni regulator napona sa proporcionalno-integrirajućim (PI) djelovanjem. Parametri regulatora određeni su analitičkim putem primjenom kriterija optimuma dvostrukog odnosa. Učinkovitost regulacije testnog postava povjerena je eksperimentalno za širok raspon radnih režima. Rezultati pokazuju da predloženi sustav regulacije struje daje relativno brze i dobro prigušene odzive, a da podređeni regulator napona DC međukruga dobro stacionira (ustaljuje) napon DC međukruga tijekom pražnjenja baterije/ultrakondenzatora.

Identifikacija modela baterije temelji se na kvazi-statičkom nadomjesnom strujnom krugu. Postupak identifikacije uključuje slijedeće korake: (i) određivanje statičke karakteristike napona otvorenog kruga u ovisnosti o struji pražnjenja dobivene postupnim pražnjenjem baterije, (ii) određivanje maksimalne količine ispražnjenog naboja (nabojskog kapaciteta) u ovisnosti o struji pražnjenja dobivene testom pražnjenja konstantnom strujom, (iii) estimacije statičkih mapa unutarnjeg otpora i elektromotorne sile baterije temeljene na prikladnim identifikacijskim testovima i upotrebi adaptivnog Kalmanovog filtra, (iv) rekonstrukcije parazitskog napona baterije i (v) identifikacije prijelaznih karakteristika napona na stezaljkama baterije. Pomoću dobivenih rezultata identifikacije baterije napravljena su dva simulacijska modela: (i) model sa uključenim potpunim mapama dobivenih karakteristika i

(ii) model sa osrednjenim karakteristikama unutarnjeg otpora i napona polarizacije. Oba modela su provjerena na eksperimentalnim podacima, pri čemu potpuniji model (očekivano) pokazuje bolje slijeđenje napona otvorenog kruga u odnosu na onaj sa osrednjenim vrijednostima. Oba modela pokazuju približno jednake rezultate simulacije stanja napunjenosti, jer on ovisi samo o struji i količini ispražnjenog naboja.

Identifikacija dinamičkog modela ultrakondenzatorskog sustava uključuje: (i) estimaciju kapacitivnosti ultrakondenzatora u ovisnosti o naponu temeljenu na jednostavnom eksperimentu punjenja/pražnjenja, (ii) identifikaciju efekta samopražnjenja i (iii) estimaciju parametara nadomjesnog vremenski-diskretnog ARX modela ultrakondenzatora. Dobiveni modeli ultrakondenzatora validirani su primjenom analize autokorelacije pogreške predikcije modela, a parametri ARX modela su poslije iskorišteni za proračun kapacitivnosti, te serijskog i paralelnog otpora nadomjesnog strujnog kruga ultrakondenzatorskog modula. Dobiveni parametri ultrakondenzatorskog modula iskorišteni su za izradu dinamičkih simulacijskih modela koji su uspješno validirani u odnosu na eksperimentalno snimljene podatke.

LITERATURA

- [1] Kiehne, H. A.: Battery Technology Handbook, Second Edition, Marcel Dekker, New York, 2003.
- [2] Li, S., Ke, B.: Study of Battery Modeling using Mathematical and Circuit Oriented Approaches, 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, str.1-8, San Diego, California, Srpanj 2011.
- [3] Sarasua, A. E., Molina, M. G., Pontoriero, D. E., Mercado P. E.: Modelling of NAS Energy Storage System for Power System Applications, 2010 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, str. 555-560, Sao Paulo, Brazil, Studeni 2010.
- [4] Car, S.: Obnovljivi izvori energije: Tehnologije i razvoj gospodarstva, prezentacija, FER Zagreb, 27. listopada 2009.
- [5] J. R. Miller. A. F. Burke: Electrochemical Capacitors: Challenges and Opportunities for Real-World Applications, The Electrochemical Society's Interface, Vol. 17 (2008.), No. 1, str. 53-58
- [6] Pavković, D., Hoić, M., Petrić, J., Herold, Z., Deur, J.: An Overview of Energy Storage Systems Considering Renewable Energy Applications, interni izvještaj, Zagreb, 2012.
- [7] <http://www.energyharvestingjournal.com/articles/supercapacitors-replace-batteries-00004386.asp?sessionid=1>, 11. siječanj 2013.
- [8] Windarko, N. A., Choi, J.: SOC Estimation Based on OCV for NiMH Batteries Using an Improved Takacs Model, Journal of Power Electronics, Vol. 10 (2010.), No. 2, str. 181-186
- [9] Hrgetić, M.: Eksperimentalni postav punjača baterija: Opis izvedbe te analiza i ispitivanje funkcionalnosti i karakteristika energetske elektroničke komponente silazno-uzlaznog istosmjernog pretvarača, Seminarski rad iz kolegija Sustavi energetske elektronike, FER Zagreb, 2012.
- [10] Isermann, R.: Digital Control Systems, Vol. 1, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1989.
- [11] Deur, J., Pavković, D.: Fundamentals of Electrical Drive Controls, UNESCO Encyclopedia of Life Support Systems, Poglavlje 6.39.21, 2012.
- [12] Ceraolo, M.: New Dynamical Models of Lead-Acid Batteries, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15 (2000.), No. 4, str. 1184-1190

- [13] Linden, D., Reddy, T. B. (ed.): Handbook of Batteries, 3rd ed., McGraw-Hill, New York, USA, 2002.
- [14] Treptow, R. S.: The lead-acid battery: its voltage in theory and practice, Journal of Chemical Education, Vol. 79 (2002.), No. 3, str. 334-338
- [15] Erickson, R.: Lead-acid batteries, lecture notes for Power Electronics and Photovoltaic Power Systems Laboratory Course (ECEN 4517/5517), Department of Electrical and Computer Engineering, University of Colorado, Boulder, USA, 2012.
- [16] Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., Flannery, B. P.: Numerical Recipes in C – The Art of Scientific Computing, 2nd ed., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1992.
- [17] B404C Battery Data Sheet, Vapiemme Accumulatori S.P.A., 2010.
- [18] Welch, G., Bishop, G.: An introduction to the Kalman filter, tutorial, Department of Computer Science, University of North Carolina, Chapel Hill, 2001.
- [19] Pavković, D., Deur, J.: Nastavni materijali iz Neizrazitog i digitalnog upravljanja, PowerPoint prezentacije, FSB, 2008.
- [20] HC Series Ultracapacitors, Maxwell Technologies, 2009.
- [21] Zubieta, L., Bonert, R.: Characterization of Double-Layer Capacitors for Power Electronics Applications, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 36 (2000.), No. 1, str. 199-205

DODATCI

- I. Dodatak A – Prikaz strukture obrade podataka i izrade matrica EMS i otpora baterije
- II. Dodatak B – Simulacijski modeli baterije u Matlab/Simulinku i potrebne rutine za pokretanje
- III. Dodatak C – M-skripta za identifikaciju ARX modela ultrakondenzatora
- IV. Dodatak D – Simulacijski modeli ultrakondenzatora u Matlab/Simulinku i potrebne rutine za pokretanje

Dodatak A – Prikaz strukture obrade podataka i izrade matrica EMS i otpora baterije

Prikupljeni rezultati eksperimenata za identifikaciju elektromotorne sile i unutarnjeg otpora baterije (kojih ima preko 170) prikupljeni su u zajedničku bazu podataka na računalu. Rezultati pojedinih eksperimenata spremeni su u *.lvm* formatu razvrstavani su i naknadno obrađivani u programu MatlabTM. Podatke je potrebno pravilno razvrstati kako bi rutine za izradu matrica i grafova estimiranih vrijednosti ispravno radile. Unutar glavne datoteke treba napraviti četiri datoteke s obzirom na apsolutni iznos struje baterije (*Betch_proc_05A*, *Betch_proc_10A*, *Betch_proc_15A*, *Betch_proc_20A*), unutar kojih se nalaze datoteke za svaku od radnih točaka ovisno o njihovom broju (*run01*, *run02*, *run03*, *run04*, *run05*, *run06*, *run07* za slučaj sedam radnih točaka). U datoteku pojedine radne točke spremaju se rezultati eksperimenata obavljeni u toj točki (obično tri eksperimenta za punjenje i tri za pražnjenje baterije). Tako razvrstani podatci pogodni su za obradu napravljenim rutinama. U glavnoj datoteci nalazi se M-skripta *init_mean.m* kojom se pokreću rutine za obradu. Ona služi odabiru struje, tj. želimo li pokrenuti rutinu samo za jednu mjerenu struju ili za sve mjerene struje odjednom. Ona potom poziva M-skriptu unutar datoteke s obzirom na struju baterije *betch_proc_data.m* koja otvara datoteke svake pojedine radne točke i unutar njih poziva M-skriptu *proc_data.m*.

M-skripta *proc_data.m* učitava dobivene rezultate unutar datoteke u kojoj se nalazi kao matrice sa četiri stupca, gdje svaki stupac predstavlja jednu bilježenu veličinu. Prvi stupac prikazuje bilježeno vrijeme mjerenja (*t*), drugi stupac bilježeni ispražnjeni naboj iz baterije (*dQb*), treći stupac mjerenu struju sa senzora propuštenu kroz anti-aliasing filter (*ibm_aaf*) i četvrti stupac bilježi mjereni napon propušten kroz anti-aliasing filter (*Ubm_aaf*). Matrice rastavlja na vektore i reže im 10% početnih i krajnjih vrijednosti kako bi se izbjegao šum u signalu izazvan uključivanjem/isključivanjem sklopki. Prema potrebi iscrtava grafove mjerenih vrijednosti u svakoj točki. Izrazima za Kalmanov filter estimira unutarnji otpor (*Rb*) i elektromotornu silu (*EMS*). Uzima dvadeset zadnjih vrijednosti estimiranih vektora i njihovu srednju vrijednost sprema u matricu. Jednako tako, sprema se i osrednjena vrijednost vektora struje. Prema potrebi iscrtava estimirane vrijednosti za svaki pojedini eksperiment unutar pojedine radne točke. Tako obrađeni podatci razvrstavaju se na vrijednosti pri punjenju i pražnjenju u M-skripti *betch_proc_data.m* s obzirom na osrednjenu vrijednost struje prema predznaku pojedinog člana. Sukladno struji i njima pripadajući vektori *EMS* i *Rb* razvrstavaju

se na punjenje i pražnjenje. Obradom svih radnih točaka dobiju se puni vektori EMS i Rb u za ukupni ciklus punjenja/pražnjenja baterije. Dobivene točke se opisuju i iscrtavaju kubičnom interpolacijom s obzirom na ΔQ_b , SoC i SoC_0 . Tako interpolirane krivulje estimiranih vrijednosti korištene su za izradu look-up tablica prilikom projektiranja simulacijskog modela baterije u Matlab/Simulinku. Shematski prikaz postupka predložen je sljedećim dijagramom:



U nastavku su dani kodovi korištenih M-skripti za obradu eksperimentalnih podataka pri punjenju/pražnjenju baterije strujom od 5 A. Za ostale iznose struje postupak je isti samo uz korištenje njihovih setova eksperimenata.

init mean.m

```
% Pokreni obradu podataka

close all; clear;

disp('Odaberi koje podatke zelis obraditi ili izlazak!')
disp(' ')
disp('Snimanje na 5A => izaberi < 1 >')
disp('Snimanje na 10A => izaberi < 2 >')
disp('Snimanje na 15A => izaberi < 3 >')
disp('Snimanje na 20A => izaberi < 4 >')
disp('Sva snimanja => izaberi < 5 >')
disp('Izlazak iz rutine => izaberi < -1 >')
data_set = input('Set podataka = ');
disp(' ')

if isempty(data_set), data_set = 4; end

if (data_set > 0.5 & data_set < 1.5)
    cd Batch_proc_05A
    % Obrada podataka ...
    batch_proc_mean;
    % povratak natrag
    cd ..
elseif (data_set > 1.5 & data_set < 2.5)
    cd Batch_proc_10A
    % Obrada podataka ...
    batch_proc_mean;
    % povratak natrag
    cd ..
elseif (data_set > 2.5 & data_set < 3.5)
    cd Batch_proc_15A
    % Obrada podataka ...
    batch_proc_mean;
    % povratak natrag
    cd ..
elseif (data_set > 3.5 & data_set < 4.5)
    cd Batch_proc_20A
    % Obrada podataka ...
    batch_proc_mean;
    % povratak natrag
    cd ..
elseif (data_set > 4.5 & data_set < 5.5)
    cd Batch_proc_05A
    % Obrada podataka ...
    batch_proc_mean;
    % povratak natrag
    cd ..

    cd Batch_proc_10A
```

```

    % Obrada podataka ...
    batch_proc_mean;
    % povratak natrag
    cd ..

    cd Batch_proc_15A
    % Obrada podataka ...
    batch_proc_mean;
    % povratak natrag
    cd ..

    cd Batch_proc_20A
    % Obrada podataka ...
    batch_proc_mean;
    % povratak natrag
    cd ..
else
    disp('Izlazak ...')
    disp(' ')
end

```

batch_proc_mean.m

```

% Initialize data vectors for different test runs
DQb_vect05 = [0 0 0 5 5 5 10 10 10 15 15 15 20 20 20 25 25 25 30 30 30 30];
DQb_vect_avg05 = [0 5 10 15 20 25 30];

Rb_vect_p05A = []; Rb_vect_m05A = [];
EMF_vect_p05A = []; EMF_vect_m05A = [];

Rb_vect_pos05_avg = []; Rb_vect_min05_avg = [];
EMF_vect_pos05_avg = []; EMF_vect_min05_avg = [];

% read first data batch
cd run01

% process
proc_data;

sign_p = curr_v > 3.0;
sign_n = curr_v < -3.0;

Rb_vect_pos05_avg = [Rb_vect_pos05_avg sum(Rb_v.*sign_p)/sum(sign_p)];
Rb_vect_min05_avg = [Rb_vect_min05_avg sum(Rb_v.*sign_n)/sum(sign_n)];
EMF_vect_pos05_avg = [EMF_vect_pos05_avg sum(EMF_v.*sign_p)/sum(sign_p)];
EMF_vect_min05_avg = [EMF_vect_min05_avg sum(EMF_v.*sign_n)/sum(sign_n)];

for(cntr = 1:6)
    if(curr_v(cntr) > 3.0)
        Rb_vect_p05A = [Rb_vect_p05A Rb_v(cntr)];
        EMF_vect_p05A = [EMF_vect_p05A EMF_v(cntr)];
    else
        Rb_vect_m05A = [Rb_vect_m05A Rb_v(cntr)];
        EMF_vect_m05A = [EMF_vect_m05A EMF_v(cntr)];
    end
end

```

```
end

% switch to root directory
cd ..

% read second data batch
cd run02

% process
proc_data;

sign_p = curr_v > 3.0;
sign_n = curr_v < -3.0;

Rb_vect_pos05_avg = [Rb_vect_pos05_avg sum(Rb_v.*sign_p)/sum(sign_p)];
Rb_vect_min05_avg = [Rb_vect_min05_avg sum(Rb_v.*sign_n)/sum(sign_n)];
EMF_vect_pos05_avg = [EMF_vect_pos05_avg sum(EMF_v.*sign_p)/sum(sign_p)];
EMF_vect_min05_avg = [EMF_vect_min05_avg sum(EMF_v.*sign_n)/sum(sign_n)];

for(cntr = 1:6)
    if(curr_v(cntr) > 3.0)
        Rb_vect_p05A = [Rb_vect_p05A Rb_v(cntr)];
        EMF_vect_p05A = [EMF_vect_p05A EMF_v(cntr)];
    else
        Rb_vect_m05A = [Rb_vect_m05A Rb_v(cntr)];
        EMF_vect_m05A = [EMF_vect_m05A EMF_v(cntr)];
    end
end

cd ..

% read third data batch
cd run03

% process
proc_data;

sign_p = curr_v > 3.0;
sign_n = curr_v < -3.0;

Rb_vect_pos05_avg = [Rb_vect_pos05_avg sum(Rb_v.*sign_p)/sum(sign_p)];
Rb_vect_min05_avg = [Rb_vect_min05_avg sum(Rb_v.*sign_n)/sum(sign_n)];
EMF_vect_pos05_avg = [EMF_vect_pos05_avg sum(EMF_v.*sign_p)/sum(sign_p)];
EMF_vect_min05_avg = [EMF_vect_min05_avg sum(EMF_v.*sign_n)/sum(sign_n)];

for(cntr = 1:6)
    if(curr_v(cntr) > 3.0)
        Rb_vect_p05A = [Rb_vect_p05A Rb_v(cntr)];
        EMF_vect_p05A = [EMF_vect_p05A EMF_v(cntr)];
    else
        Rb_vect_m05A = [Rb_vect_m05A Rb_v(cntr)];
        EMF_vect_m05A = [EMF_vect_m05A EMF_v(cntr)];
    end
end

cd ..

% read fourth data batch
```

```
cd run04

% process
proc_data;

sign_p = curr_v > 3.0;
sign_n = curr_v < -3.0;

Rb_vect_pos05_avg = [Rb_vect_pos05_avg sum(Rb_v.*sign_p)/sum(sign_p)];
Rb_vect_min05_avg = [Rb_vect_min05_avg sum(Rb_v.*sign_n)/sum(sign_n)];
EMF_vect_pos05_avg = [EMF_vect_pos05_avg sum(EMF_v.*sign_p)/sum(sign_p)];
EMF_vect_min05_avg = [EMF_vect_min05_avg sum(EMF_v.*sign_n)/sum(sign_n)];

for(cntr = 1:6)
    if(curr_v(cntr) > 3.0)
        Rb_vect_p05A = [Rb_vect_p05A Rb_v(cntr)];
        EMF_vect_p05A = [EMF_vect_p05A EMF_v(cntr)];
    else
        Rb_vect_m05A = [Rb_vect_m05A Rb_v(cntr)];
        EMF_vect_m05A = [EMF_vect_m05A EMF_v(cntr)];
    end
end

cd ..

% read fifth data batch
cd run05

% process
proc_data;

sign_p = curr_v > 3.0;
sign_n = curr_v < -3.0;

Rb_vect_pos05_avg = [Rb_vect_pos05_avg sum(Rb_v.*sign_p)/sum(sign_p)];
Rb_vect_min05_avg = [Rb_vect_min05_avg sum(Rb_v.*sign_n)/sum(sign_n)];
EMF_vect_pos05_avg = [EMF_vect_pos05_avg sum(EMF_v.*sign_p)/sum(sign_p)];
EMF_vect_min05_avg = [EMF_vect_min05_avg sum(EMF_v.*sign_n)/sum(sign_n)];

for(cntr = 1:6)
    if(curr_v(cntr) > 3.0)
        Rb_vect_p05A = [Rb_vect_p05A Rb_v(cntr)];
        EMF_vect_p05A = [EMF_vect_p05A EMF_v(cntr)];
    else
        Rb_vect_m05A = [Rb_vect_m05A Rb_v(cntr)];
        EMF_vect_m05A = [EMF_vect_m05A EMF_v(cntr)];
    end
end

% switch to root directory
cd ..

% read sixth data batch
cd run06

% process
proc_data;
```

```

sign_p = curr_v > 3.0;
sign_n = curr_v < -3.0;

Rb_vect_pos05_avg = [Rb_vect_pos05_avg sum(Rb_v.*sign_p)/sum(sign_p)];
Rb_vect_min05_avg = [Rb_vect_min05_avg sum(Rb_v.*sign_n)/sum(sign_n)];
EMF_vect_pos05_avg = [EMF_vect_pos05_avg sum(EMF_v.*sign_p)/sum(sign_p)];
EMF_vect_min05_avg = [EMF_vect_min05_avg sum(EMF_v.*sign_n)/sum(sign_n)];

for(cntr = 1:6)
    if(curr_v(cntr) > 3.0)
        Rb_vect_p05A = [Rb_vect_p05A Rb_v(cntr)];
        EMF_vect_p05A = [EMF_vect_p05A EMF_v(cntr)];
    else
        Rb_vect_m05A = [Rb_vect_m05A Rb_v(cntr)];
        EMF_vect_m05A = [EMF_vect_m05A EMF_v(cntr)];
    end
end

% switch to root directory
cd ..

% read seventh data batch
cd run07

% process
proc_data;

sign_p = curr_v > 3.0;
sign_n = curr_v < -3.0;

Rb_vect_pos05_avg = [Rb_vect_pos05_avg sum(Rb_v.*sign_p)/sum(sign_p)];
Rb_vect_min05_avg = [Rb_vect_min05_avg sum(Rb_v.*sign_n)/sum(sign_n)];
EMF_vect_pos05_avg = [EMF_vect_pos05_avg sum(EMF_v.*sign_p)/sum(sign_p)];
EMF_vect_min05_avg = [EMF_vect_min05_avg sum(EMF_v.*sign_n)/sum(sign_n)];

for(cntr = 1:8)
    if(curr_v(cntr) > 3.0)
        Rb_vect_p05A = [Rb_vect_p05A Rb_v(cntr)];
        EMF_vect_p05A = [EMF_vect_p05A EMF_v(cntr)];
    else
        Rb_vect_m05A = [Rb_vect_m05A Rb_v(cntr)];
        EMF_vect_m05A = [EMF_vect_m05A EMF_v(cntr)];
    end
end

% switch to root directory
cd ..

% Interpolation
rac_05 = min(DQb_vect_avg05):0.25:max(DQb_vect_avg05);
inter_R_avg_pos05 = interp1 (DQb_vect_avg05,Rb_vect_pos05_avg,
rac_05,'cubic');
inter_R_avg_min05 = interp1 (DQb_vect_avg05,Rb_vect_min05_avg,
rac_05,'cubic');
inter_EMS_avg_pos05 = interp1 (DQb_vect_avg05,EMF_vect_pos05_avg,
rac_05,'cubic');
inter_EMS_avg_min05 = interp1 (DQb_vect_avg05,EMF_vect_min05_avg,
rac_05,'cubic');

```

```
lw = 2; ms = 8;
```

```
figure(1),
plot(DQb_vect05,Rb_vect_p05A,'b*','LineWidth',lw,'MarkerSize',ms),grid
on,hold on
plot(DQb_vect05,Rb_vect_m05A,'bo','LineWidth',lw,'MarkerSize',ms)
ylabel('R_b [Ohm]'),xlabel('\Delta Q_b [Ah]')
legend('Charging','Discharging')
```

```
figure(2)
plot(DQb_vect05,EMF_vect_p05A,'b*','LineWidth',lw,'MarkerSize',ms),grid
on,hold on
plot(DQb_vect05,EMF_vect_m05A,'bo','LineWidth',lw,'MarkerSize',ms)
ylabel('EMF [V]'),xlabel('\Delta Q_b [Ah]')
legend('Charging','Discharging')
```

```
figure(3),
plot(DQb_vect_avg05,Rb_vect_pos05_avg,'b*','LineWidth',lw,'MarkerSize',ms),grid on,hold on
plot(DQb_vect_avg05,Rb_vect_min05_avg,'bo','LineWidth',lw,'MarkerSize',ms)
ylabel('R_b [Ohm]'),xlabel('\Delta Q_b [Ah]')
legend('Charging','Discharging')
```

```
figure(4)
plot(DQb_vect_avg05,EMF_vect_pos05_avg,'b*','LineWidth',lw,'MarkerSize',ms),grid on,hold on
plot(DQb_vect_avg05,EMF_vect_min05_avg,'bo','LineWidth',lw,'MarkerSize',ms)
ylabel('EMF [V]'),xlabel('\Delta Q_b [Ah]')
legend('Charging','Discharging')
```

```
% SoC_0
SoC_0 = 1-DQb_vect_avg05/74.8;
```

```
% Interpolation
rac1_05 = max(SoC_0):(-0.001):min(SoC_0);
inter_SoC_R_avg_pos05 = interp1 (SoC_0,Rb_vect_pos05_avg, rac1_05,'cubic');
inter_SoC_R_avg_min05 = interp1 (SoC_0,Rb_vect_min05_avg, rac1_05,'cubic');
inter_SoC_EMS_avg_pos05 = interp1 (SoC_0,EMF_vect_pos05_avg,
rac1_05,'cubic');
inter_SoC_EMS_avg_min05 = interp1 (SoC_0,EMF_vect_min05_avg,
rac1_05,'cubic');
```

```
figure(5)
plot(SoC_0, Rb_vect_pos05_avg,'b*','LineWidth',lw,'MarkerSize',ms),grid on,hold on
plot(SoC_0, Rb_vect_min05_avg,'bo','LineWidth',lw,'MarkerSize',ms)
ylabel('R_b [Ohm]'),xlabel('SoC_0')
```

```
figure(6)
plot(SoC_0, EMF_vect_pos05_avg,'b*','LineWidth',lw,'MarkerSize',ms),grid on,hold on
plot(SoC_0, EMF_vect_min05_avg,'bo','LineWidth',lw,'MarkerSize',ms)
ylabel('EMF [V]'),xlabel('SoC_0')
```

```
% SoC
```

```
SoC = 1-DQb_vect_avg05/47.5;
```

```
% Interpolation
rac2_05 = max(SoC):(-0.001):min(SoC);
inter_SoC1_R_avg_pos05 = interp1 (SoC,Rb_vect_pos05_avg, rac2_05,'cubic');
inter_SoC1_R_avg_min05 = interp1 (SoC,Rb_vect_min05_avg, rac2_05,'cubic');
inter_SoC1_EMS_avg_pos05 = interp1 (SoC,EMF_vect_pos05_avg,
rac2_05,'cubic');
inter_SoC1_EMS_avg_min05 = interp1 (SoC,EMF_vect_min05_avg,
rac2_05,'cubic');
```

```
figure(7)
plot(SoC, Rb_vect_pos05_avg, 'b*', rac2_05, inter_SoC1_R_avg_pos05, 'b--',
'LineWidth',lw, 'MarkerSize',ms), grid on, hold on
plot(SoC, Rb_vect_min05_avg, 'bo', rac2_05, inter_SoC1_R_avg_min05, 'b-
.', 'LineWidth',lw, 'MarkerSize',ms)
ylabel('R_b [Ohm]'), xlabel('SoC')
```

```
figure(8)
plot(SoC, EMF_vect_pos05_avg, 'b*', rac2_05, inter_SoC1_EMS_avg_pos05, 'b--',
'LineWidth',lw, 'MarkerSize',ms), grid on, hold on
plot(SoC, EMF_vect_min05_avg, 'bo', rac2_05, inter_SoC1_EMS_avg_min05, 'b-
.', 'LineWidth',lw, 'MarkerSize',ms)
ylabel('EMF [V]'), xlabel('SoC')
```

proc data.m

```
% number of data sets
data_sets_no = 6;

filenames =
['Test_238.lvm'; 'Test_239.lvm'; 'Test_240.lvm'; 'Test_241.lvm'; 'Test_242.lvm'
; 'Test_243.lvm'];

Rb_v = []; EMF_v = []; curr_v = [];

for(data_cnt = 1:data_sets_no)

    a = load(filenames(data_cnt,:));

    len = max(size(a));
    beg_p = 0.1;
    end_p = 0.9;

    t = a(fix(beg_p*len):fix(end_p*len),1);
    DQb = a(fix(beg_p*len):fix(end_p*len),2);
    ibm_aaf = a(fix(beg_p*len):fix(end_p*len),3);
    Ubm_aaf = a(fix(beg_p*len):fix(end_p*len),4);

    %      % Crtanje tipičnih mjernih signala
    %      figure(11)
    %      plot(t,Ubm_aaf,'b','LineWidth',2), grid on, hold on, ylabel('Filtered
u_b [V]')
    %      subplot(212), plot(t, ibm_aaf, 'k', 'LineWidth',2), grid on, hold
on, ylabel('Filtered i_b [A]')
    %      xlabel('t [s]')
```

```

len_data = length(t);
Q_par = 1.0e-4;
P1 = 100;
K1 = 1e-2;
H1 = ibm_aaf(2)-ibm_aaf(1);
Q1 = Q_par;
R1 = 1;
Rb_est1 = zeros(1,length(t));
Rb_est1(1,1) = 0.0;
EMF_est1 = zeros(1,length(t));
EMF_est1(1,1) = Ubm_aaf(1);

for(cnt = 1:100)
    P1 = P1 - K1*H1*P1 + Q1;
    K1 = P1*H1'/(H1*P1*H1' + R1);
end

for(cnt = 2:len_data)
    P1 = P1 - K1*H1*P1 + Q1;
    H1 = ibm_aaf(cnt)-ibm_aaf(cnt-1);
    K1 = P1*H1/(H1*P1*H1' + R1);
    if(abs(ibm_aaf(cnt)) > 3.0)
        Rb_est1(cnt) = Rb_est1(cnt-1) + K1*(Ubm_aaf(cnt)-Ubm_aaf(cnt-1)
- H1*Rb_est1(cnt-1));
        EMF_est1(cnt) = Ubm_aaf(cnt) - Rb_est1(cnt)*ibm_aaf(cnt);
    else
        Rb_est1(cnt) = Rb_est1(cnt-1);
        EMF_est1(cnt) = Ubm_aaf(cnt);
    end
end

Rb_v = [Rb_v mean(Rb_est1(len_data-20:len_data))];
EMF_v = [EMF_v mean(EMF_est1(len_data-20:len_data))];
curr_v = [curr_v mean(ibm_aaf)];

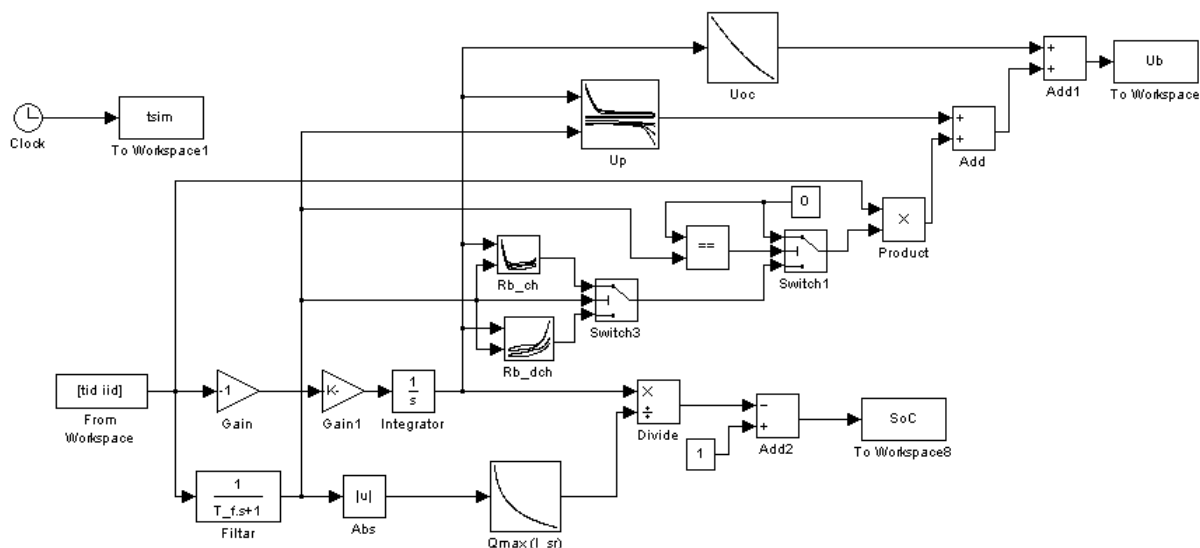
%      %Iscrtavanje estimiranih vrijednosti
%      figure(12)
%      subplot(211),plot(t,Rb_est1,'b','LineWidth',2),grid
on,ylabel('Estimated R_b [\Omega]'),hold on
%      %subplot(212),plot(t,Ubm_aaf,'k','LineWidth',2),grid on,hold on
%      %subplot(212),plot(t,(EMF_est1' +
ibm_aaf.*Rb_est1'),'r','LineWidth',2)
%      subplot(212),plot(t,EMF_est1,'b','LineWidth',2),grid
on,ylabel('Estimated EMF [V]'),hold on
%      %legend('Battery terminal voltage measurement','Battery terminal
voltage estimation','EMF')
%      xlabel('t [s]')

end

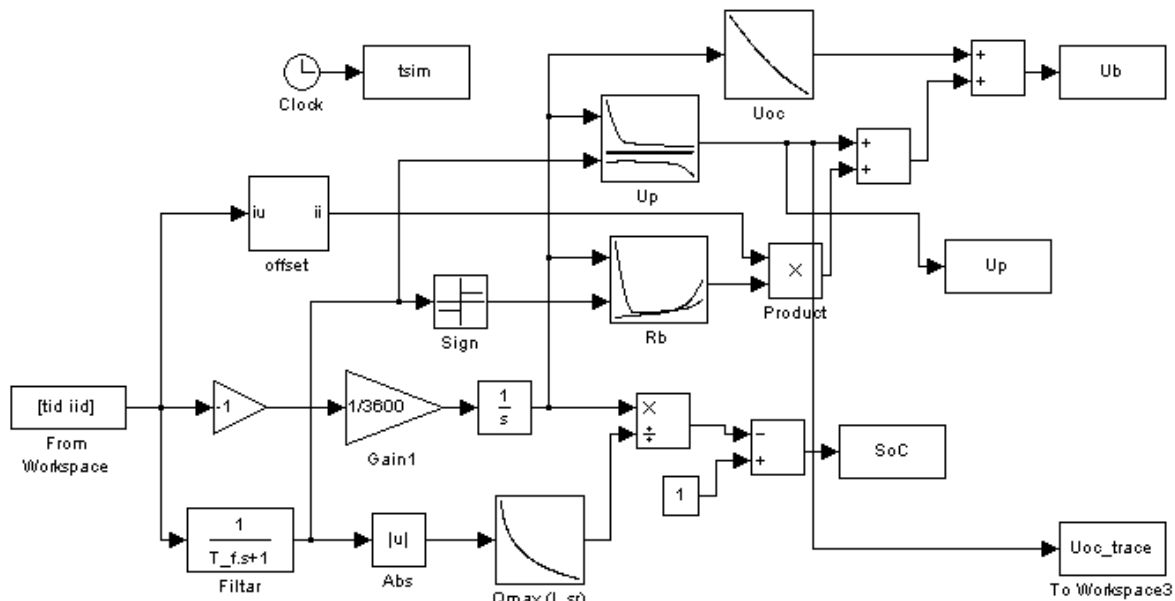
```

Dodatak B – Simulacijski modeli baterije u Matlab/Simulinku i potrebne rutine za pokretanje

Potpuni simulacijski model baterije u Matlab/Simulinku:



Osrednjeni model baterije u Matlab/Simulinku sa osrednjenim vrijednostima U_p i R_b :



M-skripta sa rutinom za pokretanje simulacijskih modela i iscrtavanje rezultata:

```
%Referenca
a = load('Test_011.lvm');
tid = a(1:50:length(a),1); % vrijeme
irid = a(1:50:length(a),2);
```

```
iid = a(1:50:length(a),3); % struja baterije
uid = a(1:50:length(a),4); % napon baterije

t = fix(tid(end)); %[s]

load('matrice_varijabli_kraceno.mat')
load('Qmax.mat')

%Qb_dqb_0 = 0;
Qb_dqb_0 = 2.22; % za Test_011
% Filter
T_f = 20; %[s]

DQb_f = DQb_int(1,:);
Uoc_DQb_f = Uoc_DQb;

%Up_zero
DQb_zero = zeros([1 121]);
DQb_z = zeros([1 101]);
DQb_fz = DQb_int(1,1:101);

%Up
Up_DQb_ch_f = Up_DQb_ch(:,1:101);
Up_DQb_dch_f = Up_DQb_dch(:,1:101);

%Up_sr
Up_DQb_ch_sr=0.25*(Up_DQb_ch_f(1,:)+Up_DQb_ch_f(2,:)+Up_DQb_ch_f(3,:)+Up_DQb_ch_f(4,:));
Up_DQb_dch_sr=0.25*(Up_DQb_dch_f(1,:)+Up_DQb_dch_f(2,:)+Up_DQb_dch_f(3,:)+Up_DQb_dch_f(4,:));

%Rb
Rb_DQb_ch_f = Rb_DQb_ch(:,1:101);
Rb_DQb_dch_f = Rb_DQb_dch(:,1:101);

%Rb_sr
Rb_DQb_ch_sr=0.25*(Rb_DQb_ch_f(1,:)+Rb_DQb_ch_f(2,:)+Rb_DQb_ch_f(3,:)+Rb_DQb_ch_f(4,:));
Rb_DQb_dch_sr=0.25*(Rb_DQb_dch_f(1,:)+Rb_DQb_dch_f(2,:)+Rb_DQb_dch_f(3,:)+Rb_DQb_dch_f(4,:));

sim('batt_sim_dqb')
figure(1)
plot(tsim/3600,Ub,'b',tid/3600,uid,'g'), grid on, hold on

sim('batt_sim_dqb_sr')
figure(1)
plot(tsim/3600,Ub,'r',tid/3600,uid,'g'), grid on
```

Dodatak C – M-skripta za identifikaciju ARX modela ultrakondenzatora

M-skripta korištena za identifikaciju ARX modela ultrakondenzatora dana je u nastavku:

```
% Estimacija parametara nadomjesnog modela ultrakondenzatora
warning off

rss = 100;
nseg = 1;

a = load('Test_026.lvm');

tid = a(:,1); % vrijeme
iid = a(:,2); % struja UC
uid = a(:,3); % napon UC

bsmp = 0.195;
esmp = 0.710;

len_ch = length(tid);
T0 = mean(diff(tid));

T = rss*T0;
Tfilt = rss*T0;
af = exp(-T/Tfilt);
numf = [(1-af) 0];
denf = [1 -af];

iid_f = filter(numf,denf,iid);
uid_f = filter(numf,denf,uid);

iid_rs = iid_f(1:rss:len_ch);
uid_rs = uid_f(1:rss:len_ch);
t_rs = tid(1:rss:len_ch);

len_rs = length(t_rs);

t_var = t_rs(fix(bsmp*len_rs):fix(esmp*len_rs));
u_var = uid_rs(fix(bsmp*len_rs):fix(esmp*len_rs));
i_var = iid_rs(fix(bsmp*len_rs):fix(esmp*len_rs));

% model s tri parametra

th = arx([i_var u_var],[1 2 0]);
[bp,ap] = th2tf(th);

Rpe3 = abs(sum(ap)/sum(bp));
Rue3 = 1/(abs(bp(1)) - 1/Rpe3);
Cue3 = -T/Rue3/log(-ap(2));

figure(1),
subplot(211),plot(t_var,u_var,'k'),grid on,hold on
subplot(212),plot(t_var,i_var,'k'),grid on,hold on
```

```
figure(2),
subplot(131),bar(1,Cue3,'b'),grid on,hold on
subplot(132),bar(1,Rue3,'b'),grid on,hold on
subplot(133),bar(1,Rpe3,'b'),grid on,hold on
title('R_p [Ohm]'),

% model s dva parametra

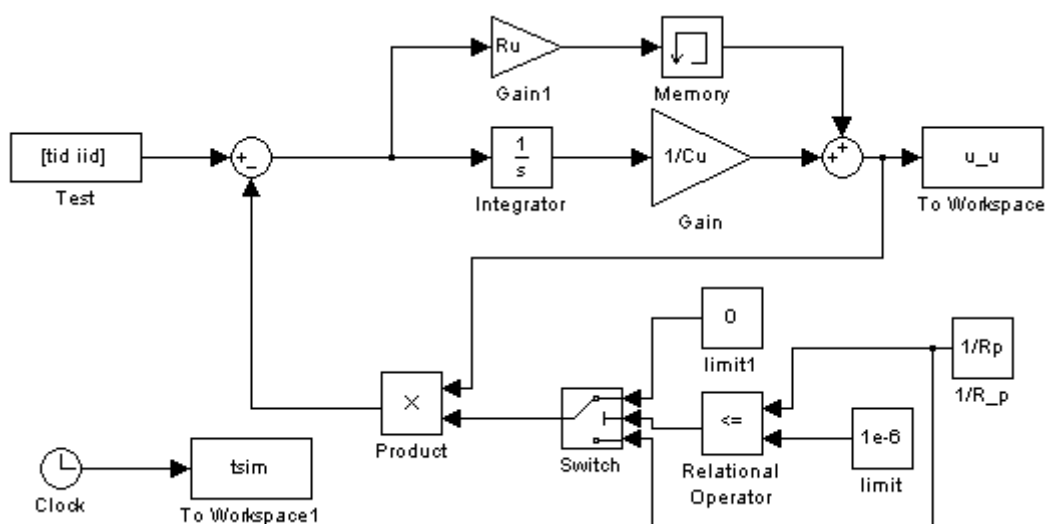
th = arx([i_var(2:length(i_var)) diff(u_var)],[1 2 0]);
[bp,ap] = th2tf(th);

Rue2 = 1/(abs(bp(1)));
Cue2 = -T/Rue2/log(-ap(2));

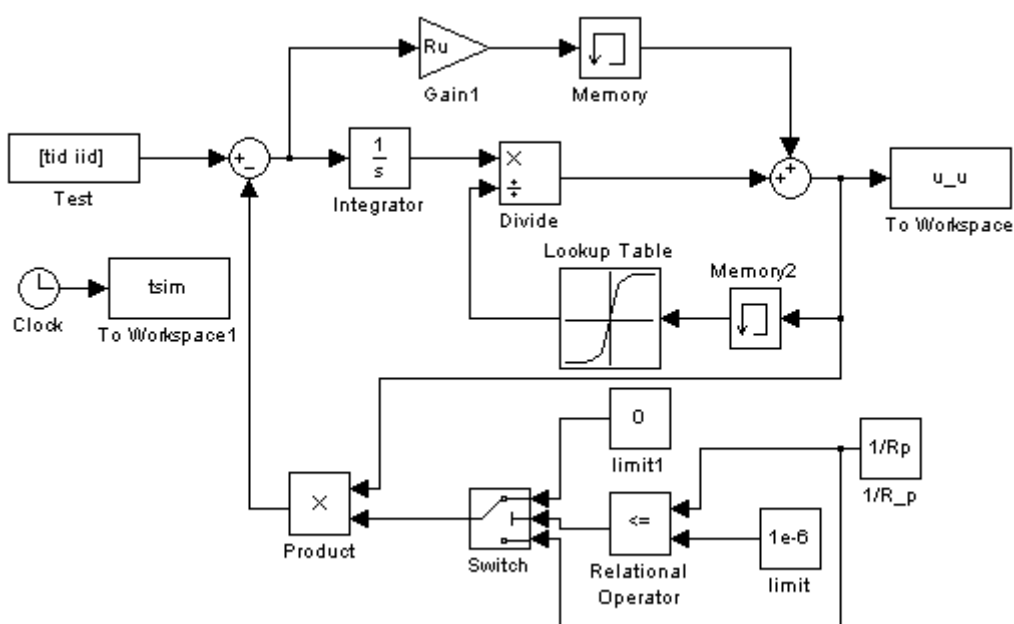
subplot(131),bar(2,Cue2,'r'),grid on,hold on
title('C_u [F]')
subplot(132),bar(2,Rue2,'r'),grid on,hold on
title('R_u [Ohm]'),
warning on
```

Dodatak D – Simulacijski modeli ultrakondenzatora u Matlab/Simulinku i potrebne rutine za pokretanje

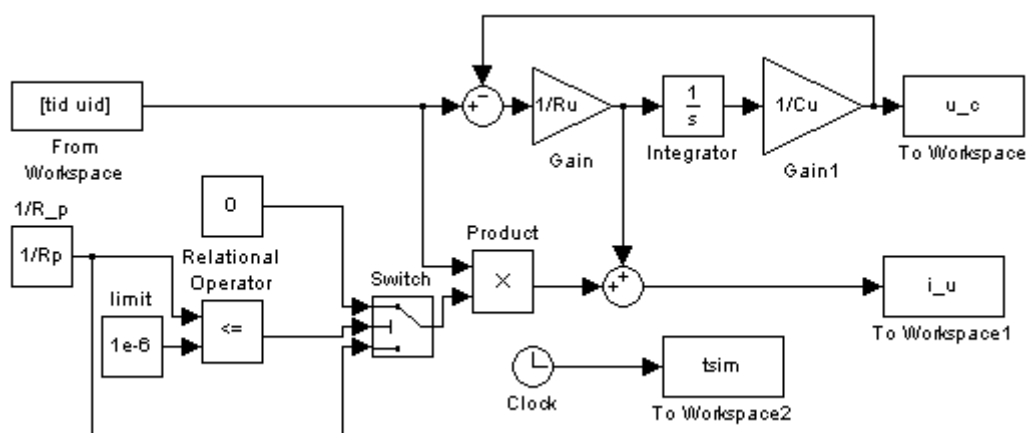
Simulacijski model ultrakondenzatora u Matlab/Simulinku sa strujom na ulazu pri konstantnom iznosu kapacitivnosti ultrakondenzatora:



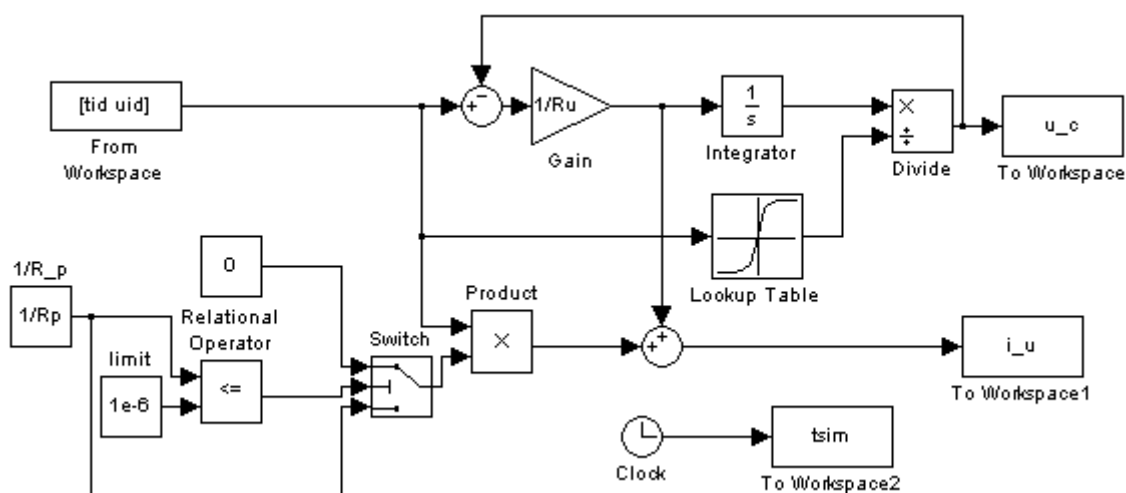
Simulacijski model ultrakondenzatora u Matlab/Simulinku sa strujom na ulazu pri promjenjivom iznosu kapacitivnosti ultrakondenzatora:



Simulacijski model ultrakondenzatora u Matlab/Simulinku sa naponom na ulazu pri konstantnom iznosu kapacitivnosti ultrakondenzatora:



Simulacijski model ultrakondenzatora u Matlab/Simulinku sa naponom na ulazu pri promjenjivom iznosu kapacitivnosti ultrakondenzatora:



M-skripta sa rutinom za pokretanje simulacijskih modela i iscrtavanje rezultata:

```
% Inicijalizacija modela ultrakondenzatora
Ru=0.11; % [Ohm]
Cu=22; % [F]
Rp=50; % [Ohm]
```

```
a = load('Test_008.lvm');
tid = a(:,1); % vrijeme
iid = a(:,2); % struja UC
uid = a(:,3); % napon UC
load('Cu_u_Test008.mat');
```



```
%Početni uvjeti za i_u
u_uc0=uid(1); %[V]

sim('model_iu_lt.mdl');
figure(1)
plot(tsim,u_u), grid on, hold on

sim('model_iu.mdl');
figure(1)
plot(tsim,u_u,'r',tid,uid,'g'), grid on, hold on

sim('model_uu_lt.mdl');
figure(2)
plot(tsim,i_u), grid on, hold on

sim('model_uu.mdl');
figure(2)
plot(tsim,i_u,'r',tid,iid,'g'), grid on, hold on
```